

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ФАЙFUРА ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 004.942:519.6

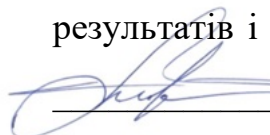
ДИСЕРТАЦІЯ

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ
МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ В ПРИЗЕМНОМУ
ШАРІ АТМОСФЕРИ

Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення
Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 В.В. Файфура

Науковий керівник: Манжула Володимир Іванович, доктор технічних наук,
доцент

Тернопіль – 2025

АНОТАЦІЯ

Файфура В.В. Математичне та програмне забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню важливої науково-технічної задачі – забезпечення просторового аналізу поширення мікропластику в атмосфері в умовах малих вибірок даних вимірювань шляхом розробки математичного та програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери з особливим акцентом на оцінку внеску таких значущих джерел забруднення, як об'єкти сфери поводження з ТПВ та дорожня інфраструктура.

Забруднення навколишнього середовища пластиком є однією з найбільш гострих екологічних проблем сучасності, що набуває глобальних масштабів. Атмосферне перенесення є важливим шляхом розповсюдження МП, сприяючи його виявленню навіть у віддалених регіонах планети. Приземний шар атмосфери, як безпосереднє середовище життєдіяльності людини та багатьох біологічних видів, є особливо вразливим до забруднення мікропластиком. Оцінка концентрації, складу та джерел атмосферного МП у цій зоні є критично важливою для розуміння масштабів проблеми та розробки ефективних стратегій її мінімізації.

Серед потенційних антропогенних джерел надходження МП у приземний шар атмосфери особливе місце посідають об'єкти сфери поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ), зокрема сміттєзвалища

та підприємства з переробки пластику. На цих об'єктах відбувається інтенсивне механічне руйнування пластикових виробів, їхнє подрібнення та переміщення, що створює значний ризик емісії МП в атмосферу вітровими потоками та іншими механізмами. Іншим вагомим джерелом атмосферного МП є дорожня інфраструктура. Абразія автомобільних шин, зношування дорожнього покриття, а також розпад пластикового сміття, що потрапляє на дороги, генерують значну кількість мікропластичних частинок, які згодом піднімаються в повітря під дією руху транспорту та вітру. Саме тому у дисертаційній роботі запропоновано математичне та програмне забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери з особливим акцентом на оцінку внеску таких джерел забруднення, як об'єкти сфери поводження з ТПВ та дорожня інфраструктура.

У першому розділі дисертації проведено аналітичний огляд проблеми поширення мікропластику, систематизовано інформацію щодо основних джерел надходження МП, які включають як первинний мікропластик (спеціально вироблені мікрогранули для промислових чи косметичних цілей), так і вторинний (утворюється при руйнуванні більших пластикових виробів). У розділі розглянуто сучасний стан методологій відбору проб МП з різних середовищ (повітря, вода, ґрунт, біота) та їх подальшого лабораторного аналізу. Також проаналізовано основні підходи до моделювання поширення мікропластику в атмосфері: Гаусові моделі, Ейлерові (АДР) та Лагранжеві моделі. Показано, що ефективна інтеграція програмного забезпечення для побудови складних динамічних моделей поширення МП та ГІС залишається складним завданням. Саме необхідність подолання цих обмежень, зокрема розробки адаптованих математичних моделей та ефективних архітектурних рішень для інтеграції розроблюваного програмного забезпечення та ГІС, формує науковий контекст та обґрунтовує актуальність і завдання даного дисертаційного дослідження.

У завершальній частині розділу здійснено постановку задачі дослідження та деталізовано основні завдання.

У другому розділі дисертаційної роботи розроблено методи для побудови моделей поширення мікропластику у безпосередній близькості до земної поверхні.

Розроблено метод математичного моделювання, що базується на фундаментальному рівнянні адвекції-дифузії-реакції. Цей підхід дозволяє врахувати основні фізичні процеси, що визначають поширення мікропластику, включаючи його поширення повітряними потоками, турбулентне розсіювання та процеси видалення з атмосфери за рахунок сухого та вологого осадження.

Для забезпечення верифікації результатів моделювання розроблено комбінований метод інтервального оцінювання МП у приземному шарі атмосфери, що поєднує етап відбору проб повітря з подальшим фізико-хімічним аналізом зібраних частинок. Запропоновано метод адаптивного налаштування параметрів моделі, що базується на оптимізації емпірично заданих коефіцієнтів шляхом мінімізації відхилення між модельованими прогнозами та експериментальними даними, отриманими в результаті застосування комбінованого методу ідентифікації МП. Такий підхід забезпечує можливість отримання моделей з гарантованими прогностичними властивостями на малих вибірках експериментальних даних, які використовуються для налаштування та верифікації моделі.

Запропоновано алгоритмічне забезпечення, описано структуру розроблених програмних модулів, їхню взаємодію та функціональні можливості, що забезпечують автоматизацію процесів обробки експериментальних даних, чисельного розв'язання рівняння адвекції-дифузії-реакції та проведення адаптивного налаштування параметрів моделей.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено розробці математичних моделей, що описують процеси поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери з урахуванням різних типів джерел антропогенного забруднення.

Також розглянуто методи формування вихідних даних для моделювання поширення мікропластику із застосуванням сучасних технологій геоінформаційних систем (ГІС).

В розділі розроблено модель поширення мікропластику від точкових джерел, таких як сміттєперероблювальні заводи. Модель враховує викиди мікропластику з окремих джерел та їх поширення на прилеглі території. Розроблено модель поширення мікропластику для оцінки впливу на довкілля сміттєзвалищ. Ця модель враховує специфічні процеси, пов'язані з поширенням мікропластику з поверхневих джерел забруднення (сміттєзвалищ), таких як фільтрація та вивітрювання. Також запропоновано модель поширення мікропластику у придорожніх екосистемах, де основним джерелом є знос автомобільних шин. Модель враховує особливості утворення та поширення мікропластику в умовах дорожнього руху та прилеглих територій.

Розроблені математичні моделі базуються на рівнянні адвекції-дифузії-реакції та враховують ключові фізичні процеси, що визначають поширення мікропластику у відповідних середовищах. Вони дозволяють прогнозувати просторово-часовий розподіл концентрації мікропластику залежно від характеристик джерела, метеорологічних умов, властивостей навколишнього середовища та фізичних властивостей самих частинок мікропластику.

У четвертому розділі дисертаційної роботи розглянуто особливості побудови програмного забезпечення, призначеного для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери. Описано особливості побудови архітектури програмного забезпечення для математичного моделювання поширення мікропластику. Формалізовано вимоги та спроектовано основні компоненти системи.

Наведено загальну архітектуру із наголосом на інтеграцію математичного, програмного та апаратного забезпечення у єдину безшовну систему, доступну для кінцевого користувача. Деталізовано основні компоненти підсистеми математичного моделювання, а також засоби візуалізації результатів.

Подано опис технології створення портативної вимірювальної станції, що поєднує апаратний блок збору даних із спеціалізованим програмним забезпеченням для забезпечення її роботи.

Наведено діаграми та схеми, що ілюструють особливості програмної реалізації середовища для моделювання поширення мікропластику. Спроековано підсистеми збереження даних із врахуванням особливостей представлення просторової даних.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні комп'ютерної системи для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери від джерел антропогенного походження.

Ключові слова: програмне середовище, архітектура програмного забезпечення, математичне моделювання, чисельне моделювання, моделювання атмосфери, диференціальне рівняння, моделі адвекції-дифузії-реакції, різницеве рівняння, аналіз інтервальних даних, методи оптимізації, моніторинг навколишнього середовища.

ANOTATION

Faifura V.V. Mathematical tools and software for modeling the dispersion of microplastics in the atmospheric surface layer. – Scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 121 – Software Engineering – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The research was carried out at the Department of Computer Science of the West Ukrainian National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Thesis is devoted to solving an important scientific and technical problem – ensuring the spatial analysis of microplastic distribution in the atmosphere under conditions of limited measurement data samples by developing mathematical and software for modeling microplastic spread in the near-surface atmospheric layer, with a special emphasis on evaluating the contribution of significant pollution sources such as municipal solid waste management facilities and road infrastructure.

Environmental microplastic pollution represents one of the most pressing and globally widespread ecological challenges of our time. Atmospheric transport plays a significant role in microplastic dispersion, contributing to its presence even in remote regions of the planet. The near-surface atmospheric layer, as the immediate living environment for humans and numerous biological species, is particularly vulnerable to microplastic contamination. Accurate assessment of atmospheric microplastic concentration, composition, and sources in this zone is crucial for comprehending the problem's scale and developing effective mitigation strategies.

Among potential anthropogenic sources of microplastic release into the near-surface atmosphere, waste management facilities, particularly landfills and plastic recycling plants, hold a prominent position. These sites experience intensive mechanical degradation, fragmentation, and displacement of plastic products, creating a substantial risk of microplastic emission into the atmosphere via wind currents and other mechanisms. Another significant source of atmospheric

microplastic is road infrastructure. Abrasion of vehicle tires, wear of road surfaces, and the degradation of plastic litter on roads generate considerable quantities of microplastic particles that subsequently become airborne due to traffic movement and wind.

Therefore, this dissertation proposes mathematical and software solutions for modeling microplastic dispersion in the near-surface atmosphere, with a particular emphasis on assessing the contribution of pollution sources such as waste management facilities and road infrastructure.

The first chapter provides an analytical review of microplastic dispersion, systematizing information on primary sources, including primary microplastics (specifically manufactured microgranules for industrial or cosmetic purposes) and secondary microplastics (formed from the breakdown of larger plastic products). The chapter examines the current state of methodologies for sampling microplastics from various media (air, water, soil, biota) and their subsequent laboratory analysis. It also analyzes key approaches to atmospheric microplastic modeling, including Gaussian, Eulerian (ADR), and Lagrangian models. The study reveals that effective integration of software for constructing complex dynamic microplastic dispersion models with GIS remains a challenging task. The necessity of overcoming these limitations, specifically through the development of adapted mathematical models and efficient architectural solutions for integrating the developed software with GIS, defines the scientific context and substantiates the relevance and objectives of this dissertation research. The concluding part of the chapter formulates the research problem and details its primary objectives.

The second chapter of the dissertation focuses on developing methods for constructing microplastic dispersion models in close proximity to the Earth's surface. A mathematical modeling method based on the fundamental advection-diffusion-reaction (ADR) equation has been developed. This approach effectively accounts for key physical processes governing microplastic dispersion, including airborne transport, turbulent diffusion, and atmospheric removal processes due to dry and wet deposition. To ensure the verification of modeling results, a combined method for

interval estimation of microplastic in the near-surface atmosphere was developed, integrating air sampling with subsequent physicochemical analysis of collected particles. An adaptive model parameter tuning method is proposed, based on optimizing the specified coefficients by minimizing the deviation between modeled predictions and experimental data obtained from the combined microplastic identification method. This approach ensures the possibility of obtaining models with guaranteed predictive properties using small samples of experimental data for model fine-tuning and verification. Algorithmic support has been proposed, detailing the structure, interaction, and functional capabilities of the developed software modules that automate experimental data processing, numerical solution of the advection-diffusion-reaction equation, and adaptive model tuning.

The third chapter of the dissertation is dedicated to the development of mathematical models describing microplastic dispersion processes in the near-surface atmosphere, considering various types of anthropogenic pollution sources. Methods for generating input data for microplastic dispersion modeling using modern geographic information system (GIS) technologies are also discussed. The chapter presents a model for microplastic dispersion from point sources, such as waste processing plants, accounting for microplastic emissions from individual sources and their spread to adjacent territories. A model for microplastic dispersion to assess the environmental impact of landfills has been developed. This model considers specific processes related to microplastic dispersion from areal pollution sources (landfills), such as filtration and weathering. Additionally, a model for microplastic dispersion in roadside ecosystems, where the primary source is tire wear, is proposed. This model accounts for the peculiarities of microplastic formation and dispersion in road traffic conditions and adjacent areas. The developed mathematical models are based on advection-diffusion-reaction equations and incorporate key physical processes that govern microplastic dispersion in the respective environments. They allow for the prediction of the spatio-temporal distribution of microplastic concentration depending on source

characteristics, meteorological conditions, environmental properties, and the physical properties of the microplastic particles themselves.

The fourth chapter of the dissertation examines the specifics of developing software designed for modeling microplastic dispersion in the near-surface atmosphere. It describes the unique aspects of designing the software architecture for mathematical modeling of microplastic dispersion, formalizes requirements, and designs the system's main components. The overall architecture is presented, emphasizing the integration of mathematical, software, and hardware components into a unified, seamless system accessible to the end-user. The key components of the mathematical modeling subsystem and visualization tools for results are detailed. A description of the technology for creating a portable measuring station is provided, combining a hardware data collection unit with specialized software to ensure its operation. Diagrams and schemes illustrating the peculiarities of the software implementation of the microplastic dispersion modeling environment are presented. Data storage subsystems are designed, considering the specifics of spatial data representation.

The practical significance of the obtained results lies in the creation of a computer system for modeling microplastic dispersion in the near-surface atmosphere from anthropogenic sources.

Keywords: software environment, software architecture, mathematical modeling, computational modeling, atmospheric modeling, advection-diffusion-reaction models, differential equation, difference operator, interval data analysis, optimization methods, environmental monitoring.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Манжула В., Файфура В. Архітектура геоінформаційної системи для моніторингу та моделювання поширення мікропластичних мас у повітрі. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Том 347. № 1. С. 512–522. (1,2 д.а. / 0,9 д.а.; особистий внесок: запропоновано методику отримання інтервальних оцінок концентрації мікропластику в точках вимірювань завислих речовин в атмосфері; запропоновано архітектурні рішення щодо розробки програмного забезпечення системи для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери).

DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-70>.

2. Манжула В., Файфура В. Моделювання поширення концентрації мікропластику у атмосфері для об'єктів сфери поводження з ТПВ. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”. 2025. № 1 (40). С. 60–69. (1,1 д.а. / 0,8 д.а.; особистий внесок: розроблено математичну модель поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції для точкових джерел антропогенного забруднення).

DOI: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2025-1-40-60-69>.

3. Manzhula V., Dyvak M., Melnyk A., Faifura V., Momotiuk E. Identification of Models of Static Systems with Nonlinear Characteristics Based on Interval Data Analysis. International Journal of Computing. 2025. Vol. 24. No. 1. P. 19–27. (1,0 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: проведено аналіз оптимізаційних методів з нелінійною цільовою функцією).

DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3872>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Tymchyshyn V., Melnyk A., Manzhula V., Faifura V., Romanets I., Tymchyshyn B. The System Architecture of the Software for Modeling Harmful

Emissions in Soil. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT. 2023. P. 58–62. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: запропоновано архітектурні рішення для інтеграції системи із зовнішніми програмно-апаратними комплексами).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275416> (Scopus).

5. Tymchyshyn V., Melnyk A., Faifura V., Tymchyshyn B., Mazur I.-S., Honchar L. Data Management Service Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT. 2024. P. 678–682. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: розроблено процедури сервісу управління даними для мікросервісної архітектури).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712526>

6. Faifura V., Spivak I., Krepych S. Context-Aware Invasive Plant Instance Synthesis for UAV-Based Crop Field Image Augmentation. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT. 2023. P. 614–617. (0,5 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: запропоновано алгоритм інтеграції програмних модулів для методів інтелектуального аналізу).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275663> (Scopus).

7. Файфура В., Манжула В., Файфура В. Еколого-просторові аспекти забруднення території Тернопільської області мікропластичними масами. Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України. 2023. № 28. С. 59–71. (1,3 д.а. / 0,8 д.а.; особистий внесок: проведено аналіз джерел забруднення мікропластиком приземистого шару атмосфери для Тернопільської області).

DOI: <https://doi.org/10.35774/rarrpsu2023.28.059>.

8. Faifura V., Bondar O., Faifura V. Ecological-Spatial Aspects of Pollution in the Region by Elastoplastic Micromasses. Економічний дискурс. 2024. № 1–2. С. 44–51. (0,88 д.а. / 0,6 д.а.; особистий внесок: проведено аналіз процесів забруднення мікропластиком приземистого шару атмосфери).

DOI: <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2024-1-5>.

9. Файфура В., Бицюра Л., Файфура В. Забруднення довкілля мікропластичними масами в контексті моделювання його просторового поширення. Освіта, наука, бізнес, енергетичні технології: сучасний стан, проблеми та перспективи: матеріали XIII Національної науково-практичної конференції. 2024. С. 76–78. (0,1 д.а. / 0,05 д.а.; особистий внесок: аналіз та обґрунтування математичного забезпечення для моделювання поширення мікропластику в атмосфері).

<http://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/52354>.

10. Faifura V., Manzhula V., Tsiaputa A., Striletskyi M., Franko Y. Review of GIS Architecture for Environmental Monitoring: from Standalone Monoliths to AI-Ready Systems. CEUR Workshop Proceedings. 2023. Vol. 3974. P. 50–62. (0,75 д.а. / 0,5 д.а.; особистий внесок: проведено аналіз архітектур геоінформаційних систем та обґрунтування архітектурних рішень з інтеграції їх функціоналу з запропонованою системою).

<https://ceur-ws.org/Vol-3974/paper05.pdf>

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ В АТМОСФЕРІ	25
1.1. Характеристика основних джерел та процесів поширення мікропластику	26
1.2. Огляд методів моніторингу мікропластику в довкіллі	36
1.3. Огляд методів моделювання поширення мікропластику	45
1.4. Аналіз програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику та його інтеграції з ГІС	50
1.5. Постановка завдання дослідження	59
Висновки до розділу 1.....	63
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ В ПРИЗЕМНОМУ ШАРІ АТМОСФЕРИ.....	65
2.1. Метод моделювання поширення мікропластику на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції	66
2.2. Комбінований метод оцінки концентрації мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі інтервального аналізу.....	79
2.3. Метод адаптивного налаштування параметрів моделі АДР на основі методів оптимізації із використанням інтервального аналізу	89
2.4. Алгоритмічне забезпечення реалізації методів моніторингу та моделювання поширення мікропластику.....	104
Висновки до розділу 2.....	112
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ НА ОСНОВІ ДЖЕРЕЛ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ	114
3.1. Формування вихідних даних для моделювання із використанням ГІС	115
3.2. Математична модель поширення мікропластику від точкових джерел	123
3.3. Математична модель поширення мікропластику для оцінки впливу на довкілля сміттєзвалищ	133
3.4. Математична модель поширення мікропластику в придорожній екосистемі внаслідок зносу шин	146

Висновки до розділу 3.....	155
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ	157
4.1 Проектування системи	157
4.2 Архітектура системи моніторингу мікропластичних мас в повітрі	162
4.3 Програмно-апаратне забезпечення для польових вимірювань мікропластику у повітрі	170
4.4 Реалізація системи для моделювання поширення мікропластику.....	179
Висновки до розділу 4.....	190
ВИСНОВКИ	191
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	194
ДОДАТОК А DDL БАЗИ ДАНИХ СИСТЕМИ	217
ДОДАТОК Б ЛІСТИНГ КОДУ ОСНОВНИХ МОДУЛІВ ПРОГРАМИ	222
ДОДАТОК В СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	241
ДОДАТОК Д АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ..	243

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МП – мікропластик

ТПВ – тверді побутові відходи

ГІС – геоінформаційні системи

TWP – tyre wear particles

NILU – Norwegian Institute for Air Research

SEM – скануюча електронна мікроскопія

TEM – просвічуюча електронна мікроскопія

FTIR – інфрачервона спектроскопія

PVC – полівінілхлорид

PET – поліетилентерефталат

PP – поліпропілен

PE – поліетилен

АДР – адвекція-дифузія-реакція

OGC – Open Geospatial Consortium

WMS – Web Map Service

WFS – Web Feature Service

CSW – Catalog Service for the Web

AWS – Amazon Web Services

EKS – Elastic Kubernetes Service

MVC – Model View Control

MVT – Model-View-Template

СУБД – система управління базами даних

DDL – Data Definition Language

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Забруднення навколишнього середовища пластиком є однією з найбільш гострих екологічних проблем сучасності, що набуває глобальних масштабів. Серед різноманітних форм пластикового забруднення особливу увагу привертає мікропластик (МП) – частинки полімерів розміром менше 5 мм. Завдяки своїм малим розмірам, стійкості до розкладання та здатності до транспортування різними середовищами, МП становить значну загрозу для екосистем, біорізноманіття та здоров'я людини.

Атмосферне перенесення є важливим шляхом розповсюдження МП, сприяючи його виявленню навіть у віддалених регіонах планети. Приземний шар атмосфери, як безпосереднє середовище життєдіяльності людини та багатьох біологічних видів, є особливо вразливим до забруднення МП. Оцінка концентрації, складу та джерел атмосферного МП у цій зоні є критично важливою для розуміння масштабів проблеми та розробки ефективних стратегій її мінімізації.

Дослідження проблеми моделювання поширення мікропластику набуває все більшої актуальності. Значних результатів в даному напрямі досягнули такі вчені, як С. Аллен, Д. Аллен, Н. Еванджеліу, С. Екгардт, Дж. Брейні, Да-Цюань Бао, К. Ван Кальстер, Я. Хуфкенс, Н. Мачін, А. Штайн. Українські вчені також роблять значний внесок у цю сферу, зокрема: Т.А. Сафранов, В. Ю. Приходько, В.І. Михайленко, М.В. Фортуна та О.О. Борисовська, які досліджують поширення атмосферного мікропластику.

Незважаючи на зростаючу кількість досліджень, присвячених проблемі мікропластику, питання моніторингу його атмосферного розповсюдження, особливо в контексті визначення внеску конкретних джерел, таких як об'єкти сфери поводження з ТПВ та дороги, залишається недостатньо вивченим. Зокрема сміттєзвалища та підприємства з переробки пластику. На цих об'єктах відбувається інтенсивне механічне руйнування пластикових виробів, їхнє

подрібнення та переміщення, що створює значний ризик емісії МП в атмосферу вітровими потоками та іншими механізмами. Іншим вагомим джерелом атмосферного МП є дорожня інфраструктура. Абразія автомобільних шин та гальмівних колодок генерують значну кількість мікропластичних частинок, які згодом піднімаються в повітря під дією руху транспорту та вітру.

Існуючі методи моніторингу часто є трудомісткими, потребують складного лабораторного обладнання та не завжди забезпечують необхідну просторову та часову роздільну здатність для ефективної оцінки розподілу мікропластику та ідентифікації його джерел.

У цьому контексті розробка та застосування сучасних моделей, методів та відповідного програмного забезпечення є перспективним напрямом для комплексного моніторингу мікропластику в приземному шарі атмосфери. Використання ГІС, завдяки їхнім можливостям просторового аналізу, візуалізації та інтеграції різноманітних даних, можуть суттєво підвищити ефективність програмного забезпечення моніторингу, дозволяючи здійснювати просторове моделювання розповсюдження мікропластику від визначених джерел, оцінювати зони підвищеного ризику забруднення та візуалізувати результати для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Актуальність даної дисертаційної роботи визначається необхідністю розв'язання важливої науково-технічної задачі – забезпечення просторового аналізу поширення мікропластику в атмосфері в умовах малих вибірок даних вимірювань шляхом розробки математичного та програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери з особливим акцентом на оцінку внеску таких значущих джерел забруднення, як об'єкти сфери поводження з ТПВ та дорожня інфраструктура. Результати дослідження сприятимуть глибшому розумінню процесів атмосферного перенесення мікропластику, оцінці екологічних ризиків та розробці науково-обґрунтованих заходів для запобігання та мінімізації цього виду забруднення на локальному та регіональному рівнях.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є забезпечення просторового аналізу поширення мікропластику в атмосфері в умовах малих вибірок даних вимірювань шляхом розробки математичного та програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери з особливим акцентом на оцінку внеску таких значущих джерел забруднення, як об'єкти сфери поводження з ТПВ та дорожня інфраструктура.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз проблеми забруднення довкілля мікропластиком, виявити основні джерела та механізми його поширення в атмосфері, а також методи моніторингу та математичного моделювання цього процесу;
- обґрунтувати та розробити метод моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери, що базується на рівнянні адвекції-дифузії-реакції, та метод адаптивного налаштування параметрів рівняння із використанням методів оптимізації;
- розробити комбінований метод інтервальної оцінки концентрації мікропластику в пробах атмосферного повітря для побудови, адаптивного налаштування та верифікації математичних моделей;
- розробити алгоритмічне забезпечення для реалізації запропонованих методів моделювання;
- розробити комплекс математичних моделей поширення мікропластику в умовах малих вибірок даних вимірювань від ключових типів антропогенних джерел: точкових, лінійних та поверхневих;
- розробити архітектурні рішення та реалізувати програмне забезпечення на основі розроблених методів і математичних моделей.

Об'єкт дослідження. Процеси моделювання поширення мікропластику у приземному шарі атмосфери.

Предмет дослідження. Методи та математичні моделі поширення мікропластику у приземному шарі атмосфери.

Методи дослідження. При проведенні досліджень використано такі методи: методи теорії систем, математичного моделювання, оптимізації та інтервального аналізу – для моделювання на основі диференціальних рівнянь в частинних похідних з використанням рівняння адвекції-дифузії-реакції для опису процесів перенесення, турбулентного розсіювання та реакції (осадження) мікропластику в приземному шарі атмосфери, адаптації моделей для різних типів джерел забруднення, методи обчислювальної математики – використання методів скінченних різниць та інших чисельних схем для апроксимації та розв'язання рівняння адвекції-дифузії-реакції, застосування алгоритмів оптимізації для адаптивного налаштування параметрів рівняння (коефіцієнтів дифузії, швидкостей осідання тощо) математичної моделі шляхом мінімізації розбіжностей між модельними розрахунками та даними спостережень. Методи об'єктно-орієнтованої парадигми програмування та методи теорії алгоритмів для побудови алгоритмів реалізації чисельних методів, процедур адаптивного налаштування параметрів та інтеграції даних, а також програмних модулів для реалізації математичних моделей та їх інтеграції з ГІС.

Наукова новизна отриманих результатів. У межах дисертаційної роботи *вперше*:

- запропоновано та обґрунтовано комбінований метод отримання інтервальних оцінок концентрації мікропластику в точках вимірювань, який, на відміну від існуючих, поєднує польові вимірювання завислих речовин та лабораторні вимірювання мікропластику в умовах малих вибірок даних, що в сукупності забезпечило зменшення кількості вимірювань для налаштування та верифікації моделей;

- запропоновано та обґрунтовано метод адаптивного налаштування параметрів математичних моделей поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції, який, на відміну

від існуючих, базується на гібридних методах оптимізації та інтервальних оцінках вимірювань концентрації мікропластику в приземному шарі атмосфери, що забезпечило гарантовані прогностичні властивості отриманих моделей в умовах малих вибірок даних вимірювань;

набули подальшого розвитку:

- математичні моделі поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції, які, на відміну від існуючих, комплексно враховують фізичні властивості процесу поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери від різних типів антропогенних джерел, що забезпечило «гарантовану» точність та прогностичні властивості таких моделей;

- архітектурні рішення щодо інтеграції комплексу математичних моделей поширення мікропластику, які, на відміну від існуючих, поєднують елементи тісного зв'язування для швидкої обробки геоданих та візуалізації та сервісно-орієнтований підхід для гнучкого підключення обчислювальних модулів реалізації побудови та налаштування моделей, що забезпечує масштабованість, гнучкість у інтеграції нових моделей або джерел даних та оптимізований робочий процес для підготовки даних.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У друкованих працях (Додаток В), опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати:

[1] – запропоновано методику отримання інтервальних оцінок концентрації мікропластику в точках вимірювань завислих речовин в атмосфері; запропоновано архітектурні рішення щодо розробки програмного забезпечення системи для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери;

[2] – розроблено математичну модель поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції для точкових джерел антропогенного забруднення;

[3] – проведено аналіз оптимізаційних методів з нелінійною цільовою функцією;

[4] – запропоновано архітектурні рішення для інтеграції системи із зовнішніми програмно-апаратними комплексами;

[5] – розроблено процедури сервісу управління даними для мікросервісної архітектури;

[6] – запропоновано алгоритм інтеграції програмних модулів для методів інтелектуального аналізу;

[7] – проведено аналіз джерел забруднення мікропластиком приземистого шару атмосфери для Тернопільської області;

[8] – проведено аналіз процесів забруднення мікропластиком приземистого шару атмосфери;

[9] – проведено аналіз та обґрунтування математичного забезпечення для моделювання поширення мікропластику в атмосфері;

[10] – проведено аналіз архітектур геоінформаційних систем та обґрунтування архітектурних рішень з інтеграції їх функціоналу з запропонованою системою.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи презентовано на 5 конференціях, зокрема:

- 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023;

- XX International Scientific Internet Conference “Intelligent Systems of Decision-Making And Problems of Computational Intelligence”, Usti Nad Labem, Czech Republic, Khmelnytskyi, Ukraine June 20-23, 2024;

- 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice, Czech Republic, 2024;

- XIII Національна науково-практична конференція «Освіта, наука, бізнес, енергетичні технології: сучасний стан, проблеми та перспективи», Тернопіль, 31 травня 2024 р;

- The Workshops «AI for Environmental and Social Sustainability Workshop» and «AI and Interdisciplinary Innovations for Sustainable Development» (YAISD-WS 2025), Ternopil-Skomorochy, May 8-9, 2025.

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 10 наукових праць (Додаток В) загальним обсягом 88 сторінок, зокрема 3 статті у фахових наукових виданнях [1, 2, 3], 1 з яких входить до міжнародної наукометричної бази Scopus та відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank віднесено до квартилю Q3 [3], 5 публікацій у матеріалах конференцій [4, 5, 6, 9, 10], 3 з яких – міжнародні, матеріали яких індексуються наукометричною базою Scopus та 2 статті у наукових журналах України [7, 8].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 179 найменувань та 4 додатки. Загальний обсяг роботи складає 247 сторінок друкарського тексту, з них 177 сторінок основного тексту. Робота містить 51 рисунок і 22 таблиці.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася в рамках пріоритетного напрямку «Інформаційні та комунікаційні технології» відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та пов'язана з науковими дослідженнями, які виконувалися за тематикою кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету.

Результати дисертаційного дослідження отримано в межах виконання молодіжного науково-дослідного дослідження на тему «Математичне та програмне забезпечення прототипу біогазової установки з підвищеною ефективністю функціонування» (державний реєстраційний номер 0124U000076).

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні комп'ютерної системи для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери від джерел антропогенного походження. Архітектура програмного забезпечення включає модулі, які використовують

для задання початкових та граничних умов моделювання, виконання обчислень, візуалізації результатів та налаштування та верифікації математичних моделей.

Запропонований комплекс моделей та їх інтеграція в комп'ютерну систему утворює інструмент для ідентифікації зон підвищеного екологічного ризику, пов'язаного з забрудненням атмосфери мікропластиком, та обґрунтування пріоритетних заходів з охорони довкілля.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використано:

- у ТОВ «ЕКО БАЛАНС ТЕР» (сміттесортувальний завод) для проведення щоквартального моніторингу викидів мікропластичних мас в атмосферу та оцінки стану довкілля прилеглих територій (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 28 квітня 2025 р);

- у ПП «Катруб» (сміттєперероблювальний завод) для проведення щоквартального моніторингу викидів мікропластику в атмосферне повітря та оцінки потенційного стану ґрунтів на прилеглій території (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 28 квітня 2025 р);;

- в НДЧ ЗУНУ при виконанні молодіжного науково-дослідного дослідження на тему «Математичне та програмне забезпечення прототипу біогазової установки з підвищеною ефективністю функціонування» (державний реєстраційний номер 0124U000076) (довідка від 29 квітня 2025 р.);

- в ІТ компанії «Forte Group», при розробці програмно-технічних комплексів, які інтегрують апаратні та програмні компоненти реалізовані в різномірних середовищах, (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 22 січня 2025 р);

- в освітньому процесі Західноукраїнського національного університету на кафедрі комп'ютерних наук при викладанні дисципліни «Архітектура та проектування програмного забезпечення (акт про впровадження в освітній процес від 10 квітня 2025 р.)

У додатку Д до дисертації наведено акти, що засвідчують використання результатів дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ В АТМОСФЕРІ

Перший розділ дисертації присвячено всебічному аналітичному огляду проблеми поширення мікропластику як глобального забруднювача довкілля, що набуває все більшої актуальності в сучасному науковому та суспільному дискурсі. На сьогоднішній день спостерігається безпрецедентне накопичення стійких пластикових відходів у навколишньому середовищі. Під дією фізичних, хімічних та біологічних факторів ці відходи фрагментуються на дрібніші частинки, зокрема мікропластик (умовно розміром < 5 мм), який стає повсюдним та надзвичайно стійким компонентом екосистем.

Розуміння масштабів та закономірностей поширення МП неможливе без детального аналізу його джерел та шляхів міграції в довкіллі. У даному розділі систематизовано інформацію щодо основних джерел надходження МП, які включають як первинний мікропластик (спеціально вироблені мікрогранули для промислових чи косметичних цілей), так і вторинний (утворюється при руйнуванні більших пластикових виробів). Адекватна оцінка рівнів забруднення та шляхів міграції МП неможлива без надійних методів моніторингу. У розділі розглянуто сучасний стан методологій відбору проб МП з різних середовищ (повітря, вода, ґрунт, біота) та їх подальшого лабораторного аналізу. Паралельно з розвитком методів моніторингу, ключову роль у розумінні та прогнозуванні поширення МП відіграє математичне моделювання. У розділі оглянуто основні підходи до моделювання поширення МП в атмосфері, включаючи моделі різної складності – від спрощених Гаусових моделей до складних Ейлерових (АДР) та Лагранжевих моделей.

Нарешті, невід'ємною частиною сучасних екологічних досліджень є використання геоінформаційних систем (ГІС), які надають потужні інструменти для збору, зберігання, управління, аналізу та візуалізації

просторово розподілених даних, що є надзвичайно цінним при вивченні забруднення довкілля. Проте, як буде показано в розділі, ефективна інтеграція програмного забезпечення побудови складних динамічних моделей поширення МП з ГІС залишається складним завданням. Існуючі підходи часто є негнучкими, вимагають значних зусиль для обміну даними та не дозволяють реалізувати повний цикл моделювання в єдиному середовищі. Саме необхідність подолання цих обмежень, зокрема розробки адаптованих математичних моделей та ефективних архітектурних рішень для інтеграції розроблюваного програмного забезпечення та ГІС, формує науковий контекст та обґрунтовує актуальність і завдання даного дисертаційного дослідження.

Основні результати цього розділу опубліковані в працях [45, 159, 167, 166, 168].

1.1. Характеристика основних джерел та процесів поширення мікропластику

Протягом останнього десятиліття питанню забруднення довкілля мікропластиком приділяють все більше уваги. Сприйняття цієї проблеми трансформувалося від просто занепокоєння зростаючими обсягами виробництва пластичних мас та накопичення відходів до усвідомлення появи специфічної форми забруднення. На основі проаналізованих 7000 досліджень щодо мікропластику авторським колективом [12, 14] зроблені тривожні висновки стосовно загрози людству та довкіллю від такого виду забруднень.

Пластики – це штучні та невластиві природі матеріали, а тому практично не інтегруються у природні цикли речовин. До того ж, зважаючи на свою стійкість до факторів зовнішнього середовища, макропластики розпадаються спочатку на мікрочастинки, а далі на нанопластики, формуючи специфічну форму забруднення. Загалом мікропластиком називають частинки /фрагменти пластику розміром менше 5 мм. Але слід наголосити, що досліджувана категорія поллютантів має дуже широкий спектр мікроматеріалів різних за

розмірами, формами, хімічним складом, фізичними властивостями, щільністю та іншими параметрами.

Мікропластик часто залишається невидимим для ока, хоча його кількість у середовищі відповідає масі вихідного матеріалу. Це приховує масштаб проблеми, дозволяючи виробникам використовувати добавки, які прискорюють розпад пластику на молекулярному рівні. У такому вигляді пластик легко мігрує та засвоюється живими організмами, але наслідки цього процесу залишаються непередбачуваними й потребують подальших досліджень [45].

Уявлення про мікропластик як особливий вид забруднення сформувалися ще у 1970-х роках минулого століття, проте тільки на початку XXI-го сторіччя проблему забруднення мікропластиком окреслили як один з ключових напрямків наукових досліджень. Сталося це після публікації Річардом Томсоном статті «Lost at Sea: Where Is All the Plastic?» [56]. І проблема дійсно не проста для швидкого вирішення – щороку світове виробництво пластичних мас становить приблизно 430 млн т з тенденцією до зростання. Обґрунтовуються невтішні прогнози за якими до 2060 р. обсяг світового виробництва пластиків потроїться [37]. Більшість пластику (60%) використовується менше п'яти років, а лише 9% від загальної кількості піддається переробці. Зараз тільки в ЄС викидається близько 75 тис. т – 300 тис. т мікропластиків щороку.

Сучасні уявлення про механізми утворення, поширення та накопичення мікропластику, його вплив на екосистеми, здоров'я людини та біорізноманіття базуються на дослідженнях українських і закордонних науковців [68]. Встановлено, що мікропластик негативно впливає на мікробіоми, порушуючи екологічну рівновагу середовищ, які вони населяють [6]. Мікро- та нанопластик визначаються як найпоширенішими полютантами, які зараз зустрічаються в усіх складових екосистем [16], і забруднення цими частинками становить загрозу як для наземних, так і для водних організмів. Дехто наголошує на необхідності глобальної стратегії управління

мікропластичними відходами та впровадження інноваційних технологій для їх усунення, зокрема використання пластиків у виробництві біопалива [1].

Часто підкреслюється, що під час розпаду мікропластичних мас у довкілля потрапляє велика кількість різних токсичних речовин, які застосовують при виробництві пластмас, а саме еластифікатори, процесингові агенти, барвники, наповнювачі, затверджувачі, відбілювачі, спінювачі, інгібітори горіння та інші сполуки. Відповідно мікропластик виступає транспортним засобом для небезпечних хімічних речовин [72].

Попри значну увагу до глобальних і екосистемних підходів, роль мікропластику в забрудненні на мікрорегіональному рівні залишається недостатньо вивченою. «Невидимість» цього типу забруднення знижує його пріоритетність, особливо у порівнянні з іншими, більш очевидними проблемами на місцях. Водночас з'являються дослідження, які аналізують вплив мікропластику на екологічну безпеку регіонів та його роль у формуванні стратегії сталого розвитку [82], а також впливу цих речовин на здоров'я людини [7].

За джерелами походження мікропластичні маси бувають первинними й вторинними. Первинний мікропластик входить до складу готових виробів і потрапляє в довкілля в тому вигляді в якому він був вироблений (мікробісер, гранули від засобів особистої гігієни, гранули для промислового виробництва, частинки волокон з синтетичних тканин тощо). Вторинний мікропластик виникає в результаті руйнування макропластиків під впливом факторів зовнішнього середовища – хвильових і температурних коливань, тертя, механічного дроблення, вітрової ерозії, дією ультрафіолетових променів [37]. Основні джерела надходження мікропластичних мас у довкілля показано на рис. 1.1.

Накопичення мікропластиків у компонентах довкілля теж має низку особливостей. На його концентрацію активно впливають погодні явища, в т. ч. швидкість і сила вітрових потоків, дощова активність впродовж року, водні течії, рельєф, ерозійні процеси, природні та антропогенні бар'єри. У

кругообігу пластичних мас мають місце їх вимивання, перенесення у вигляді пилу в складі повітряних мас, водний перенос та седиментація (осадження) в наземних і водних екологічних системах.

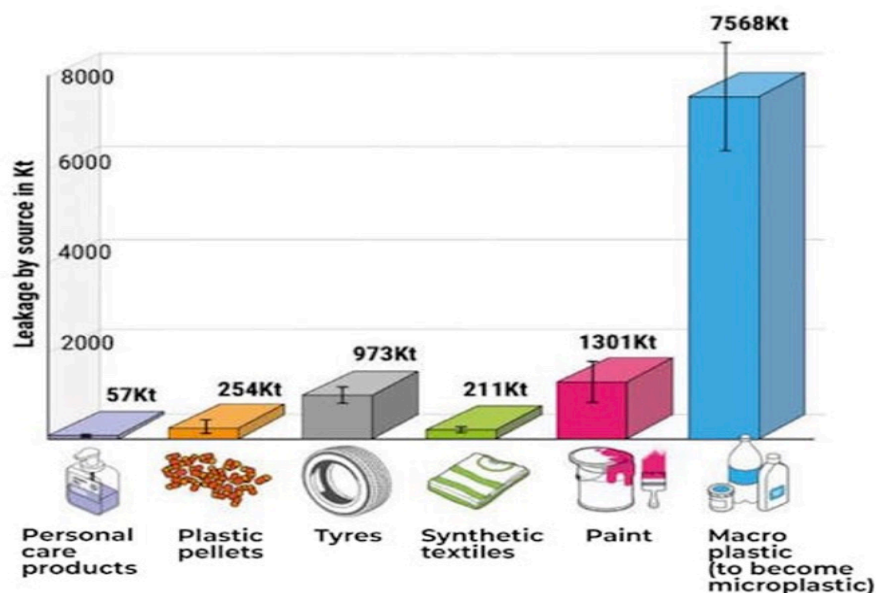


Рис. 1.1. Джерела надходження мікропластику в навколишнє середовище [28]

Питанням переносу і нагромадження мікропластиків у водному середовищі приділено більша частина усіх досліджень. А поширення цих забруднюючих речовин у атмосфері почали вивчати доволі недавно. Але вже встановлено, що повітряні потоки переміщують мікро- і нанопластичні частинки на великі відстані у вигляді дуже дрібнодисперсного пилу [18]. Однією з характеристик твердих частинок у повітрі є їх аеродинамічний діаметр: PM10 (<10 мкм), PM2.5 (<2.5 мкм, дрібні частинки) і ультрадрібні частинки (<0.1 мкм). Що ж стосується мікропластику, то тут дещо інші підходи – макропластик має розміри меншу за 5 мм, а от щодо нанопластику, то до його розмірних параметрів консенсусу досягти поки не вдається (або 1000 нм або 100 нм) [10]. Відтак, склад атмосферних твердих частинок представляє собою суміш твердих і рідких фракцій, а мікро- та нанопластик цілком реально може включатися до їх складу. Часто органічна складова коливається в діапазоні 20-60% від маси твердих частинок [32] і включають органічний вуглець, який

утворюється в результаті зношення різних механізмів, шин та гальмівних пристроїв.

Виходячи з локацій формування, накопичення та деградації макропластику, можна визначити ядра генерації та акумуляції мікропластику. Так на міських та приміських територіях спостерігають найінтенсивніші процеси утворення й нагромадження мікропластику – приблизно в 10 разів порівняно з іншими ділянками [31]. Міські території виступають важливими джерелами різних типів мікропластику. В атмосфері переважають волокна поліестру, частки, що утворюються внаслідок зношування шин і доріг і містять синтетичну гуму з великим вмістом добавок (40-60%). Дослідження швидкості осадження мікропластичних часток показують, що вона залежить від інтенсивності джерел емісії мікропластиків і віддаленістю від них [29].

Сам механізм формування мікропластичних часток багатофакторний і включає механічну, фізичну, хімічну та термічну деградацію, виділення зі стічних вод, через побутову, господарську чи промислову діяльність, а також у наслідок зносу трубопроводних систем [61]. Промислова утилізація та переробка пластику та стічних вод сприяє утворенню значної кількості мікропластичних мас, що спонукає до досліджень фізичних характеристик та ефективності видалення мікропластику [8]. Головними шляхами потрапляння мікропластику в атмосферу з місць переробки пластикових відходів є:

- атмосферна емісія, яка виникає при обробці пластикових відходів шляхом механічного подрібнення, термообробки чи спалювання;
- вітрова ерозія у результаті якої відкриті мікропластики на звалищах або при здійсненні транспортування піддаються дії вітру;
- аерозолізація з води при випаровуванні або розбризкуванні води з частинками мікропластику (аналогічно в атмосферу потрапляють кристали морської солі);
- ресуспензія пилу (процес повторного підняття разом з повітряними масами колись осілого пилу із частками мікро- та нанопластика, спричиненого вітровою активністю чи рухом транспортних засобів [32].

Сільські території часто не забезпечені належною системою утилізації, що сприяє неконтрольованому розсіюванню пластикових відходів домогосподарствами. Це призводить до формування численних локальних осередків забруднення. Агросектор також використовує капсульовані добрива та засоби захисту рослин чим щорічно забруднює сільськогосподарські угіддя у розрахунку приблизно 50 кг мікропластику на гектар [58]. Мікроплівки, що покривають гранули добрив, накопичуються в ґрунті, змінюють його структуру та деградують ґрунтово-екологічні системи. Основними джерелами мікропластику в сільськогосподарських ґрунтах є внесення добрив, використання компосту для відновлення ґрунтів, зрошення, атмосферні випадання. Завдяки своїй стійкості та неспроможності до біологічного розкладу, мікропластик накопичується в навколишньому середовищі, а, взаємодіючи з ґрунтовими факторами, погіршує якість ґрунту та його функції [62].

Важливими локаціями формування мікропластиків є автомобільні дороги, де внаслідок зношування дорожнього одягу та автомобільних шин утворюється значна кількість еластопластичних мікрочастинок. До повного зношення протектора комплекту з чотирьох шин легкового автомобіля середнього класу в навколишнє середовище потрапляє в середньому близько 14 кг гумового пилу. У випадку вантажного автомобіля, оснащеного вісьмома робочими шинами, цей показник становить близько 92 кг [73]. Дослідження процесів забруднення довкілля викидами транспортних засобів, зокрема з урахуванням режимів транспортних потоків, представлені в роботах В. Матейчика [92], Л. Коваленка, І. Гунька [73], П. Русіло, В. Костюка та В. Афоніна [84]. Інтегральні оцінки екологічного стану придорожніх зон висвітлюються у дослідженнях І. Васькіної [53] та М. Мадані [69]. Механізми дисперсії мікропластику і процеси зносу протекторних гум розглянуті у працях М. Балаки, Д. Паламарчука, П. Новохацького, В. Макарова та В. Чернеги [52].

Частинки зносу шин є суттєвим джерелом мікропластику в повітрі урбанізованих районів, тому моделювання концентрацій TWP-мікропластику (TWP – tyre wear particles), що виникає шляхом зношення шин, в атмосфері міського середовища є дуже актуальним. Для прикладу, таке дослідження було проведене у Стокгольмі, з використанням моделі NORTRIP для оцінки емісій та концентрацій TWP-PM10, зокрема для різних вулиць міста [47]. Вивчення обсягів емісії та концентрацій дало авторам змогу висновувати, що річна загальна емісія TWP-PM10 становить 10% від загальної кількості продукованих зношенням часток автомобільних шин (960 т проти 96 т Р TWP-PM10). Концентрації (середньорічні) в атмосфері коливаються в діапазоні від 0 до 1,17 мкг/м³ з найвищими їх значеннями на дорогах з інтенсивним рухом. На концентрацію TWP-PM10 чітко впливають сезонні та погодні умови – найвищі і найтриваліші вони у зимові місяці, а максимальні тимчасові спостерігаються в квітні, через ресуспензію дорожнього пилу після зимового періоду [47].

Перенесення мікропластику з дорожнього пилу в атмосферу може становити до 84% пластику в повітрі [32]. Протектори шин або механічно стираються або руйнуються термічно фрагментуючись [18] на частинки розмірами від <2,5 до 350 мкм. Це сприяє, передовсім, осіданню мікропластику в дорожньому пилу. В цілому близько 5% матеріалу від зносу автомобільних шин стають «повітряними» [49], а в районах з високою інтенсивністю руху концентрація еластомерів від повітряного зносу шин коливається в межах 2–5 мкг/м³. В цілому 1% усіх PM10 має походження від дорожніх викидів, а 15% з них – це матеріали зношених автошин [32].

Деградаційна стійкість більшості пластикових матеріалів свідчить про те, що захоронення їх на полігонах абсолютно не може вирішити проблему відходів. Такий підхід відкладає вирішення проблеми на потім. На сміттєзвалищах мікропластик масово формується шляхом температурного, вітрового вивітрювання, дії сонячної радіації, механічне руйнування матеріалу, а разі неефективного управління полігонами можна спричинити

забруднення великих прилеглих площ. У дослідженні «Просторовий розподіл концентрації мікропластику навколо сміттєзвалищ та його потенційний ризик для підземних вод» проаналізовано наявність, характеристики та кількість мікропластику, оцінено його поширення та потенційний вплив на якість підземних вод [6]. Автори наголошують, що відібраних зразках ($n = 20$) було виявлено від 2 до 80 частинок/літр, а 90% виявленого мікропластику походить від похованих пластикових відходів та їх фрагментації шляхом фізичного, хімічного та інколи біологічного розкладу.

При цьому дослідниками актуалізується проблема наявності мікропластику у самому фільтраті сміттєзвалищ (до 291 частинки на літр), залежно від умов полігону та застосованих методів аналізу [49] та необхідності подальших досліджень власне джерел мікропластику зі сміттєзвалищ через повітряне поширення, стік фільтрату, прямі скиди з установок для обробки фільтрату (рис. 1.2).

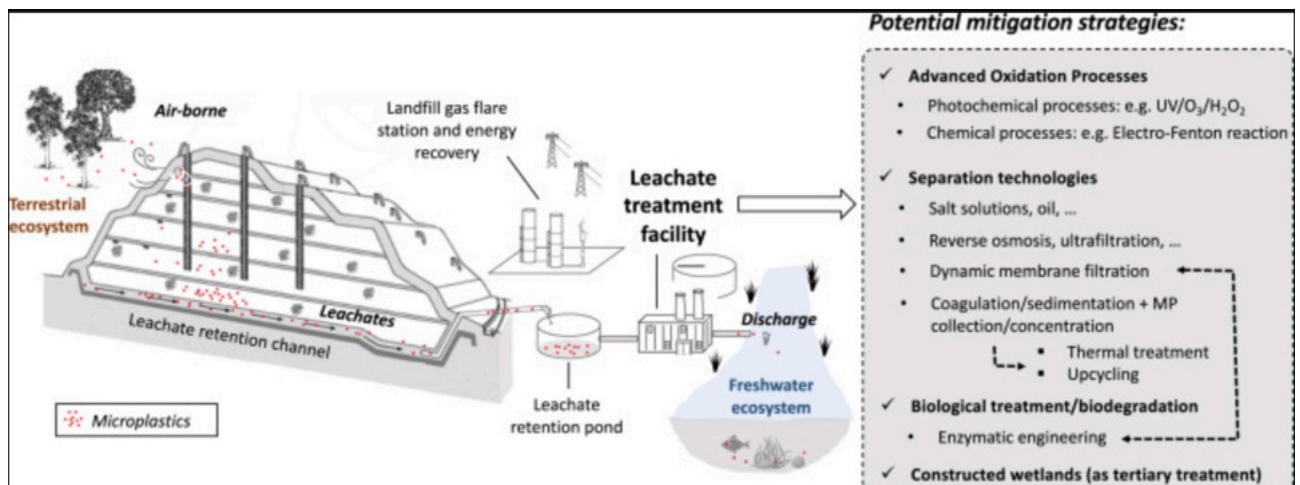


Рис. 1.2. Джерела мікропластику зі сміттєзвалищ [49]

Особливу загрозу становлять неофіційні (стихійні) сміттєзвалища – без належного управління вони є масовим джерелом мікропластикового забруднення [59], яке може негативно впливати на ґрунт і водні ресурси. Основними типами полімерів, які знаходяться на полігонах, є поліетилені,

поліпропілени та поліетилентерефталат. Розмір частинок, зазвичай варіюється від 20 мкм до > 1 мм, при чому існує залежність від субстрату – у твердих зразках вони більші за розмірами, а у рідкій фракції менші. І найдрібнішими є мікропластики у повітрі. Механізм деградації макропластику зумовлений коливаннями температури і кислотності в межах рН 4.5–9, а також механічним стисканням [50]. Дослідження фільтратів сміттєзвалищ стосовно кількісних оцінок дрібних мікропластикових частинок та аналіз їх часток при очищенні стічних вод залишається мало розкритою проблемою.

Деякі автори обґрунтовано виводять залежність впливу віку сміттєзвалища на фізичні та хімічні характеристики пластикових відходів і мікропластику [52]. Так РЕ та РР змінюють свій хімічний склад, кристалізуючись при цьому. Якщо кристалічність РР з часом зростає, для РЕ вона падає, що суттєво погіршує механічні характеристики пластикових відходів з поступовим руйнуванням вуглецевого ланцюга в молекулах пластику. Втрачається гідрофобність матеріалу, а, відтак, стійкість до впливу вологи і температур.

Однак лише недавно було встановлено його наявність в атмосфері. Одним з джерел потрапляння мікропластиків є атмосферні опади – краплі дощу захоплюють мікропластикові частинки з повітря або вивільняють їх з поверхневого шару ґрунту, сприяючи їх дальшому переносу [51]. У статті [45] автори досліджують присутність мікропластику в атмосфері, виявленого як у міських, так і у віддалених районах, що свідчить про його здатність до далекого перенесення повітряними потоками. Вони аналізують методи збору та ідентифікації зразків, відзначаючи відсутність стандартизованих підходів у цій сфері.

Природні умови та фактори середовища відіграють важливу роль у переміщенні мікропластику в атмосфері. Вітер є основним механізмом повторного підняття мікропластикових частинок із поверхні ґрунту, доріг чи відкритих територій, дозволяючи їм долати великі відстані та сприяючи глобальному поширенню [7]. Дощ очищає повітря, осаджуючи мікропластик

на сушу чи у воду, причому понад 100 частинок мікропластику може осідати на кожен квадратний метр щодня [32]. Глобальна циркуляція атмосферних потоків транспортує мікропластик навіть до віддалених і важкодоступних місць, таких як Антарктида [13]. Лісові масиви значно знижують концентрацію мікропластику в повітрі, акумулюючи ці частинки на своїй поверхні. Древа здатні поглинати до 1 г/км²/день пластикових фрагментів і до 5 г/км²/день пластикових волокон із атмосфери [21].

Отож мікропластик нині становить серйозну загрозу для довкілля, а його присутність в атмосфері стає помітнішою. Завдяки своїм малим розмірам мікропластик транспортується на великі відстані вітровими потоками, а потім осідати на поверхню з краплями дощу, туману, вивільнятися з верхніх шарів ґрунту, перенеситись у водні екосистеми.

Моніторинг мікропластику в атмосфері є складним завданням через малий розмір часток, їхню різноманітність у формах і властивостях, а також відсутність стандартизованих методів збору та аналізу. Традиційні методи не завжди можуть забезпечити необхідну точність через вплив перехресного забруднення. Необхідно розробити стандартизовані операційні протоколи для збору проб і їхнього аналізу, а також застосовувати відповідні методи контролю якості.

Зважаючи на технічні труднощі, високу вартість та обмеження можливостей традиційних методів моніторингу, потрібно звернути увагу на пошук доступніших і ефективніших способів. Це можна зробити за допомогою моделей, що враховують фізичні характеристики мікропластику та його переміщення в атмосфері. Такі моделі можуть базуватися на існуючих даних про атмосферні потоки, погодні умови та джерела викидів мікропластику. Також важливо використовувати непрямі методи дослідження, як-от оцінка осадження мікропластику та його акумуляція в екосистемах.

1.2. Огляд методів моніторингу мікропластику в довкіллі

Мікропластик – це тверді пластикові частинки, що мають розмір менше 5 мм, і є новим типом забруднювачів, що виникають через людську діяльність. Його наявність в атмосфері стає все більш загрозливою, оскільки він здатен переноситися на великі відстані, потрапляючи в різні екосистеми.

Основні джерела мікропластику в атмосфері – це механічне зношування пластикових матеріалів, викиди від промислових процесів та спалювання пластикових відходів [35], а великі обсяги мікрофібри, маючи низьку щільність, переносяться вітром і скупчуються на віддалених від походження територіях [38]. Моніторинг мікропластику в атмосфері є складним через його малий розмір і різноманітність форм. Під час збору проб із повітря застосовуються різні методи, такі як фільтрація через мембрани з дрібними порами, що дозволяє затримувати мікропластик, який осідає або переноситься по повітрю [47].

Загалом, для ефективного моніторингу мікропластику в атмосфері необхідно удосконалювати методологію, стандартизувати процедури та покращити заходи контролю якості. Це дозволить забезпечити точність і надійність результатів, що, в свою чергу, допоможе краще оцінювати рівень забруднення і розробляти ефективні заходи для його зменшення.

Використання ефективних і точних методів аналізу та моніторингу поширення мікропластику в навколишньому середовищі є ключовим етапом для оцінки його впливу на екосистеми та здоров'я людини. Оскільки мікропластик виявляється у воді, ґрунті й атмосфері, для його виявлення та оцінки використовуються різні методи. Основні з методів і їх зміст наведено у таблиці 1.1.

Збір проб і фізико-хімічний аналіз. Збір даних щодо атмосферних мікропластиків здійснюють за допомогою пасивних колекторів [36]. Таким чином визначають загальне осадження [27].

Таблиця 1.1

Методи аналізу та моніторингу поширення мікропластику в середовищі

Група методів	Зміст	Опис технології
Збирання проб та фізико-хімічний аналіз	Взяття зразків із компонентів навколишнього середовища для подальшого аналізу	З атмосфери мікропластики збирають за допомогою фільтрувальних матеріалів (активний збір) або спеціальних пасивних пасток для повітряних проб.
Мікроскопічний аналіз	Аналіз способом мікроскопії	Оптична мікроскопія виявляє частки мікропластику у межах мікронів. Електронна мікроскопія (SEM, TEM) виявляє та аналізує частинки до 1 мкм.
Спектроскопічний аналіз	Визначення складу мікропластику	FTIR (інфрачервона спектроскопія) дає змогу визначати хімічний склад і полімеразну будову часток, тоді як за допомогою Рамановської спектроскопії аналізують склад пластичних мас.
Хроматографія	Розділення різних типів пластичних мас за їх хімічними властивостями	Газова хроматографія використовується для дослідження органічних домішок у складі мікропластику. Рідинна хроматографія вивчає органічні компоненти мікропластиків.
Оцінка впливу на організми	Вивчення акумуляції мікропластиків, зміни поведінки організмів, параметрів їх життя як у природі так і в лабораторних умовах	Біомоніторинг вивчає накопичення мікропластику в організмах, через що можна судити про його присутність у середовищі їх існування. Лабораторні експерименти моделюють вплив мікропластику на живі організми, досліджуючи токсичність, поведінкові зміни, динаміку репродуктивності, стійкість і смертність.
Дистанційне зондування	Застосування БПЛА	Використання супутників або БПЛА дає змогу вивчати дисперсію мікропластику на великих площах. Потребує поєднання з іншими методами збору й аналізу для точності.
Інноваційні підходи	Застосування молекулярних маркерів та сенсорів	ДНК-аналіз ґрунтується на використанні специфічних молекулярних маркерів для виявлення мікропластику. Молекулярні сенсори виявляють мікропластик в реальному часі, що робить їх перспективними в моніторингових системах. Мало розроблені методи.

Донедавна використовували нестандартизоване обладнання для збору матеріалу, але нині для отримання проб атмосферного осадження привели застосовують металічні або скляні стандартизовані місткості за технологією NILU (Norwegian Institute for Air Research) (рис. 1.3). Це має забезпечувати

стандартизований підхід до збору пасивного атмосферного осадження без контакту з іншими видами пластику. Головною перевагою такого методу є його простота, низька вартість і відсутність потреб в енергії. Тому його можна використовувати навіть у віддалених місцях.

Найкраще, на нашу думку, його використовувати в локаціях, де заздалегідь відомо про високі концентрації мікропластичних мас – міста, місця переробки пластикових відходів, сміттєзвалища.

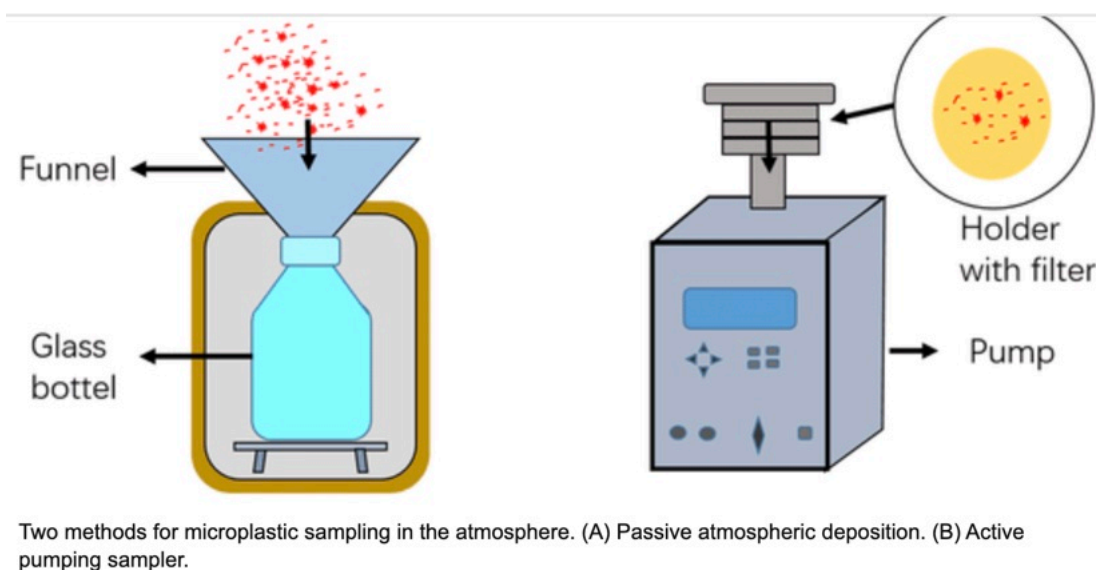


Рис. 1.3. Пристрої для пасивного і активного збору мікропластичних мас з повітря [36]

Але й недоліки цього методу – ним можна визначити лише відклади, а не зважені у повітрі частинки, до того ж ігноруються часточки LDPE, які не осідають через свою малу масу. І оцінюються площі седиментації, а не самі об’єми повітря [51].

Для відбору зразків пилу з автомобільних доріг, в середині приміщень, на відкритій місцевості використовують прибирання щіткою (без пластикової робочої поверхні), збирання пилососом і активне відкачування повітря. Цей метод застосовують часто завдяки його простій відтворюваності, але він не дає змоги точно визначати об’єм досліджуваного повітря і стверджувати, що весь зібраний мікропластик є осадженим із атмосфери.

Насосні пробовідбірники є доволі ефективні і відповідають стандартному протоколу з урахування погодних умов в локаціях дослідження [16]. Активне відкачування повітря є загальноприйнятим методом моніторингу атмосферного забруднення, але стосовно мікропластику необхідне досконаліше і вужче спеціалізоване обладнання для взяття проб [12], оскільки діапазон розмірів мікропластику обмежений розміром застосовуваного фільтруючого елемента. Фільтрація через мембрани з дуже дрібними отворами дає змогу вловлювати мікропластичні часточки з повітря, а для аналізу проб використовують вже методи інфрачервоної спектроскопії або мікроскопії.

Мікроскопічний аналіз. Оптична та електронна мікроскопії є двома основними методами для виявлення часток мікропластику. Кожна з них має свої переваги та обмеження. Оптична базується на використанні видимого світла для виявлення і аналізу мікропластикових часток і дозволяє ідентифікувати мікропластики за їх формою, розміром і кольором, відрізнити його від природних часток. Її застосовують для попереднього скринінгу зразків для виявлення часток у розмірному діапазоні від декількох мікрометрів (≥ 10 мкм) до міліметрів. Оптичний мікроскопічний аналіз здійснюють за допомогою стерео- або цифрових мікроскопів з функцією фотографування, флуоресцентних мікроскопів, які відгукуються на УФ-випромінювання. Але такі дослідження не дають змоги провести хімічний аналіз складу відібраного матеріалу, а одержані результати мають високий рівень похибки через суб'єктивність оцінок.

Натомість електронна мікроскопія забезпечує високий рівень точності аналізу: принцип його роботи заснований на бомбардуванні часток мікропластику пучком електронів за допомогою чого вони візуалізуються. За типами електронна мікроскопія буває скануючою (SEM) та просвічуюча (TEM) [24]. Перша з дуже високою роздільною здатністю зображує поверхні часток, дає змогу аналізувати морфологію та текстуру поверхні мікропластику (наприклад, подряпини, тріщини, потертість). Просвічуюча електронна мікроскопія дає змогу ідентифікувати надзвичайно дрібні частки

мікропластику (до 1 нм) і визначити не тільки склад, а й наявність домішок у мікропластику. Головним недоліком цього методу є його дорожнеча, висока вартість не лише обладнання, а й його технічного обслуговування, складнощі в підготовці зразків для аналізу. Порівняння двох типів мікроскопії мікропластику наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Порівняння методів оптичної та електронної мікроскопії

Характеристика	Оптична мікроскопія	Електронна мікроскопія
Роздільна здатність	≥ 10 мкм	До 1 нм
Хімічний аналіз	Ні	Так (SEM-EDS, TEM)
Досліджувані частки	Великі (мікропластики)	Малі (мікро- і нанопластики)
Підготовка зразків	Проста	Складна
Вартість аналізу	Відносно низька	Висока

Оптична мікроскопія є швидким і простим методом для початкового аналізу мікропластику, тоді як електронна мікроскопія забезпечує надзвичайно високу точність і детальність, особливо для нанопластиків. Часто ці методи використовуються в комбінації для отримання повнішої інформації про мікропластик.

Спектроскопічний аналіз. Інфрачервону спектроскопію (FTIR) та Раманівську спектроскопію застосовують для точної ідентифікації мікропластиків на молекулярному рівні. FTIR знайшла призначення при ідентифікації матеріалу та його характеристик матеріалів і має суттєві переваги перед іншими методами [8]. Вона дає змогу автоматизувати підрахунок, картографувати мікрочастинки, визначати їх склад включно до частинок з розмірністю до 500 мкм (рис. 1.4).

Застосування цього методу при вивченні атмосферного мікропластику обмежене дифракційною межею, дає похибку в результатах з недооцінкою аж до 35% частинок розміром менше 20 мкм [58].

Раманівська використовує вібраційну спектроскопію як і FTIR, однак, вони принципово різняться, оскільки в основі роботи першої лазер високої частоти (532 нм). Він збуджує поверхню матеріалу, викликаючи випромінювання фотонів, більшість з яких рухаються в напрямку лазера за виключенням одного з 10^7 , котрий відхиляється під кутом 90 градусів, забезпечуючи ефекту Рамана.

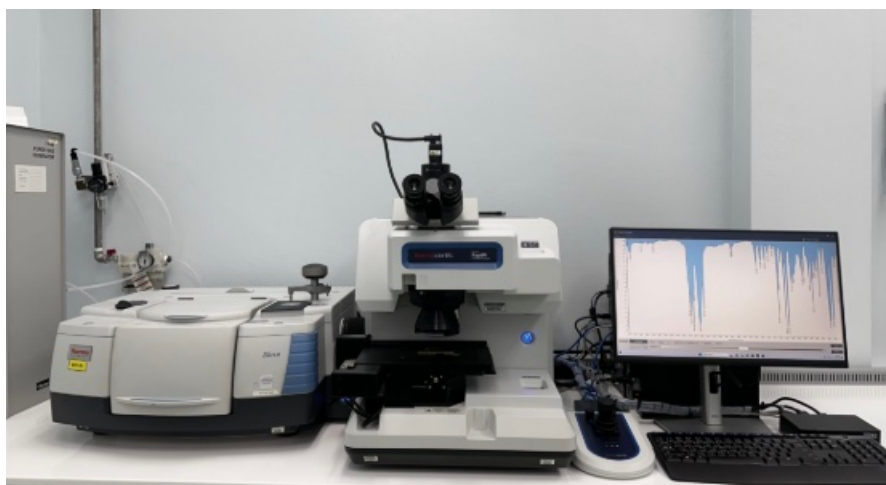


Рис. 1.4. FTIR, оснащений конфокальним мікроскопом і матрицею фокальної площини

Ця технологія є доволі новою в дослідженні мікропластику, а тому її спектральні бібліотеки розвинені погано. Зате Раманівська спектроскопія дозволяє ідентифікувати й аналізувати частинки розмірами до субмікронного рівня. Нині на практиці частинки 10 мкм є найменшими за розмірами, які піддаються аналізу цим методом, хоча є інформація про дослідження частинок розмірністю близько 2 мкм [58].

Очікується що з подальшим розвитком бібліотек і методик Раманівська спектроскопія стане головним методом аналізу атмосферного мікропластику завдяки здатності досліджувати менші частинки.

Нині робляться спроби об'єднати можливості цих двох технологій [47] та розробити і технічно забезпечити методику мультиспектроскопічного

методу, який поєднує FTIR та Raman спектроскопію для комплексного аналізу мікропластиків (MPs) [57], що забезпечить одночасний аналіз наявних частинок розмірністю >10 мкм за допомогою FTIR та <10 мкм за допомогою Raman технології.



Рис. 1.5. Раман-спектроскоп

Хроматографія. Газова хроматографія (GC) є одним із основних методів дослідження органічних сполук, пов'язаних із мікропластиком, зокрема його домішок, добавок і залишків полімерів у зразках навколишнього середовища. У поєднанні з мас-спектрометрією (GC-MS або GC-Orbitrap-MS) цей підхід дає змогу визначити хімічний склад пластику, застосовуючи термічний розклад (піроліз) [43]. Піролізно-газова хроматографія (Py-GC-MS) широко використовується для аналізу полімерних матеріалів, оскільки при високих температурах ($500\text{--}800^{\circ}\text{C}$) полімери розпадаються на леткі компоненти, які потім аналізуються для встановлення їхнього походження. Цей метод ефективний для визначення таких полімерів, як полівінілхлорид (PVC), поліетилентерефталат (PET), поліпропілен (PP), поліетилен (PE) та інші, хоча він не дозволяє зберігати інформацію про розмір або форму частинок.

Рідинна хроматографія (LC) відрізняється від GC тим, що вона орієнтована на аналіз полярних органічних речовин, які можуть міститися у складі мікропластику, наприклад, пластифікаторів, антиоксидантів і стабілізаторів. Високоєфективна та ультраєфективна рідинна хроматографія дозволяють виявляти забруднюючі речовини навіть з дуже низькими концентраціями, які потрапляють із пластикових матеріалів у воду, повітря або продукти харчування. У поєднанні з мас-спектрометрією (LC-MS) цей метод широко застосовується для виявлення потенційно небезпечних сполук у мікропластику, таких як бісфенол А (BPA) та фталати, які можуть негативно впливати на здоров'я людини.

Газова хроматографія найкраще підходить для аналізу полімерів у твердих зразках [15], тоді як рідинна хроматографія більш ефективна для дослідження малих органічних молекул, що входять до складу пластику або виділяються з нього. Поєднання цих двох методів дає можливість отримати комплексний аналіз мікропластику, включаючи його хімічний склад, наявність добавок і потенційно токсичних домішок. У перспективі розвиток тандемної мас-спектрометрії (GC-MS/MS, LC-MS/MS) та вдосконалення термохімічних методів аналізу дадуть змогу ще точніше визначати походження та трансформацію мікропластику в навколишньому середовищі, що допоможе глибше зрозуміти його вплив на екосистеми та здоров'я людини.

Оцінка впливу на організми. Біомоніторинг у дослідженні та аналізі мікропластику знаходить все ширше застосування. Деякі живі організми мають здатність накопичувати мікропластик у своїх тканинах або видимо реагують на його присутність у середовищі існування. Так автори «Microplastics' Impact on the Environment and the Challenging Selection of Reliable Key Biomonitors» [29] використали для біомоніторингу мікропластику рослини (прилипання до поверхні листя), мідії (біоаккумуляція, оскільки вони є фільтраторами), равлики (моніторинг забруднення ґрунтового середовища).

Вибір та визначення біомоніторів повинні базуватися на їхній зручності у використанні, здатності забезпечувати швидку інтерпретацію даних та

можливості стандартизації методів дослідження. Серед перспективних організмів для біомоніторингу мікропластику в різних екосистемах виділяються водорості, лишайники, мохи, молюски та равлики.

Дистанційне зондування. Супутникові знімки та дрони дозволяють досліджувати поширення мікропластику у водних і наземних екосистемах, охоплюючи великі території. Цей метод ефективний для виявлення сміттєвих зон в океанах та оцінки забруднення узбережжя, однак потребує комбінації з лабораторними аналізами для точної ідентифікації частинок мікропластику.

Інноваційні підходи. ДНК-аналіз застосовується для виявлення мікропластику шляхом використання специфічних молекулярних маркерів, які можуть виявити пластик у складних зразках, наприклад, у морських відкладеннях або біологічних тканинах. Молекулярні сенсори працюють на основі нанотехнологій та хімічних реакцій, що дозволяє ідентифікувати мікропластик у реальному часі без необхідності складної підготовки проб, що робить цей метод перспективним для автоматизованого моніторингу довкілля.

Отож, дослідження мікропластику охоплює широкий спектр методів моніторингу, аналізу та моделювання його поширення в навколишньому середовищі. Використовуються фізико-хімічні методи, такі як спектроскопія (FTIR, Raman), мікроскопія (оптична та електронна) та хроматографія (GC-MS, LC-MS), які дозволяють ідентифікувати склад і розміри частинок. Для оцінки впливу мікропластику на організми застосовуються біомоніторинг, лабораторні експерименти з водними й наземними видами, а також дослідження генотоксичності, метаболічних змін та поведінкових реакцій. Моніторинг мікропластику у воді, ґрунті та повітрі здійснюється за допомогою пасивних і активних методів відбору проб, що включають фільтрацію, вакуумне відкачування та збирання осаджених частинок.

Новітні технології, такі як дистанційне зондування за допомогою супутників і дронів, дозволяють виявляти забруднення на великих територіях, хоча вони потребують комбінації з лабораторними методами для підтвердження результатів. Інноваційні підходи, зокрема ДНК-аналіз та

молекулярні сенсори, розширюють можливості швидкого виявлення мікропластику в реальному часі. Попри значний прогрес у дослідженнях, залишається потреба в стандартизації методів, розробці автоматизованих систем аналізу та вивченні довгострокового впливу мікропластику на екосистеми і здоров'я людини.

1.3. Огляд методів моделювання поширення мікропластику

Накопичення мікропластику (МП) в усіх компонентах довкілля, включаючи атмосферне повітря, становить значну екологічну загрозу, вимагаючи глибокого розуміння шляхів його транспортування та розсіювання. Атмосферне перенесення відіграє ключову роль у глобальному та регіональному поширенні МП, забезпечуючи його доставку навіть у віддалені екосистеми. Для кількісної оцінки цього процесу, ідентифікації основних джерел та зон впливу, а також прогнозування рівнів забруднення повітря широко застосовуються методи математичного моделювання. Проте, моделювання атмосферного поширення МП є нетривіальною задачею через специфічні властивості частинок (розмір, форма, щільність), що суттєво впливають на їхню аеродинаміку та процеси осадження. Цей параграф має на меті провести огляд та критичний аналіз існуючих моделей та підходів, які використовуються для симуляції атмосферного транспорту та осадження мікропластику, оцінити їхню придатність для вирішення різних завдань та визначити напрямки для подальших досліджень.

Для моделювання атмосферного поширення МП застосовується декілька основних класів математичних моделей, що суттєво відрізняються за своєю складністю, фізичною деталізацією, обчислювальними вимогами та сферою застосування. Розглянемо основні з них.

1.3.1. Гаусові моделі.

Цей клас моделей (аналоги AERMOD, ISCST3, УПРЗА "ЕОЛ") історично є найбільш поширеним для оцінки розсіювання забруднювачів від

стаціонарних джерел. Вони базуються на аналітичних розв'язках рівняння переносу за низки спрощених припущень: стаціонарність метеорологічних умов протягом періоду усереднення (зазвичай година), прямолінійність траєкторії факелу та нормальний (Гаусів) розподіл концентрації в поперечних напрямках через турбулентну дифузію.

Головними перевагами є низька обчислювальна складність та відносна простота реалізації, що робить їх зручними для крігінгових розрахунків, експрес-оцінок та використання в деяких нормативних методиках. Вони потребують мінімального набору метеорологічних даних (швидкість, напрям вітру, клас стійкості атмосфери).

Однак, застосування Гаусових моделей для мікропластику є дуже обмеженим. Припущення стаціонарності та однорідності погано описують реальні умови в приземному шарі, особливо біля джерел зі складною геометрією. Найбільш критичним недоліком є нездатність адекватно моделювати процеси гравітаційного осідання частинок МП, які мають широкий діапазон розмірів, форм та щільності, що визначає їхню швидкість седиментації. Параметризації осідання в цих моделях занадто спрощені. Також вони мають суттєві труднощі з моделюванням поширення від площинних (звалища) та лінійних (автошляхи) джерел та в умовах нерівної підстильної поверхні або складного рельєфу. Таким чином, Гаусові моделі для МП можуть надати лише дуже наближену, переважно якісну картину забруднення.

1.3.2. Ейлерові моделі (на основі рівнянь Адвекції-Дифузії-Реакції – АДР):

Ці моделі (напр., CMAQ, WRF-Chem, моделі обчислювальної гідродинаміки – CFD) базуються на чисельному розв'язанні системи рівнянь адвекції-дифузії (та реакції, якщо потрібно) на тривимірній просторовій сітці, що покриває область інтересу. Вони описують зміну концентрації забруднювача в кожній комірці сітки з часом під дією переносу вітром (адвекція), турбулентного перемішування (дифузія) та джерел/стоків (емісія, осідання).

Дані моделі надають значно більш реалістичний опис фізичних процесів. Дозволяють враховувати нестационарні та просторово неоднорідні метеорологічні поля, вплив рельєфу та забудови. Важливою перевагою є можливість включення фізично обґрунтованих параметрів процесів сухого та вологого осідання частинок МП, що залежать від їхніх розмірів, щільності та метеоумов. Це дозволяє отримувати детальні 4D (3D + час) поля концентрацій.

Головними недоліками є висока обчислювальна складність та вимогливість до ресурсів (потужні комп'ютери, тривалий час розрахунку). Вони потребують детальних 3D метеорологічних полів як вхідних даних (часто з мезомасштабних моделей), що ускладнює їх застосування. Реалізація та налаштування таких моделей є складними. Також можливі проблеми з чисельними артефактами (напр., числова дифузія). Ефективна інтеграція та візуалізація великих масивів результатів у ГІС потребує спеціальних підходів та архітектурних рішень.

1.3.3. Лагранжеві моделі

Цей підхід (напр., HYSPLIT, FLEXPART, CALPUFF) полягає у відстеженні руху великого ансамблю віртуальних «частинок» або «квантів повітря», що випускаються з джерела. Траєкторія кожної частинки розраховується на основі поля середнього вітру (адвекція) та випадкової компоненти, що моделює турбулентну дифузію. Концентрацію отримують шляхом підрахунку частинок у комірках сітки або певних об'ємах.

Такі моделі ідеально підходять для прямого моделювання траєкторій та аналізу зв'язків «джерело-рецептор». Дозволяють дуже гнучко враховувати індивідуальні властивості частинок МП (розмір, щільність, форму) та їх вплив на осідання. Також вони не мають проблеми чисельної дифузії при моделюванні адвекції.

Хоча розрахунок траєкторій може бути швидким, отримання статистично достовірних полів концентрацій на сітці потребує моделювання дуже великої кількості частинок, що робить цей підхід надзвичайно ресурсоемним саме для цієї мети, навіть більш витратним, ніж АДР моделі.

Поля концентрацій можуть містити статистичний шум. Вимоги до вхідних метеоданих подібні до АДР моделей. Інтеграція результатів (траєкторії або поля концентрацій) у ГІС також потребує спеціальних інструментів. Критичний аналіз моделей цих типів наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3.

Критичний аналіз типів математичних моделей для задач моніторингу МП

Критерій	Гаусові моделі	Моделі АДР (Ейлерові)	Моделі Лагранжа	Висновок для задачі з МП
Фізика МП (осідання)	Спрощено, емпірично	Фізично обґрунтовано, залежить від властивостей	Дуже добре, властивості задаються для кожної частинки	АДР та Лагранжа значно кращі за Гаусові
Нестационарні умови	Погано	Добре	Добре	АДР та Лагранжа кращі для реалістичних змін погоди.
Складний рельєф/забудова	Погано / Потребує модифікацій	Добре (особливо CFD)	Добре (якщо метеодані адекватні)	АДР та Лагранжа кращі, слідує за потоками.
Джерела (площинні/лінійні/точкові)	Апроксимація	Більш точне представлення (на сітці)	Добре (через стратегію випуску частинок)	АДР та Лагранжа кращі за Гаусові для представлення геометрії джерел.
Обчислювальна складність	Низька	Висока (для точних розрахунків)	Змінна: низька для траєкторій, висока для полів концентрацій	Гаусові найшвидші. АДР та Лагранжа потребують ресурсів, Лагранжа може бути дуже повільною для отримання гладких полів концентрацій.
Простота / Вимоги до даних	Простіше	Складніше (реалізація, дані)	Складніше (стохастика, дані як в АДР)	Гаусові найпростіші. АДР та Лагранжа

				потребують детальних метеоданих та експертизи.
Інтеграція в ГІС	Стандартно легко	Потребує спеціальних рішень	Потребує рішень для частинок/полів концентрації	Гаусові легше (стандартно). АДР та Лагранжа потребують подібних за складністю спеціальних рішень для інтеграції та візуалізації.
Точність / Деталізація	Нижча	Вища (але є чисельна дифузія)	Вища для траєкторій, потенційно зашумлена для концентрацій	АДР та Лагранжа потенційно значно точніші та детальніші. Лагранжа уникає чисельної дифузії АДР, але може мати статистичний шум в полях концентрацій.
Аналіз джерело- рецептор	Обмежено	Можливо, але не так прямо	Дуже добре (прямі/зворотні траєкторії)	Лагранжа найкраще для задач визначення внеску джерел або шляхів переносу.

Оскільки основна мета моделювання в нашому випадку отримання детальних просторово-часових полів концентрацій для оцінки впливу на досліджувану територію, моделі АДР є ефективнішими (за умови належної реалізації та ресурсів).

Наші дослідження фокусуються на розробці АДР моделі, що є цілком обґрунтованим вибором для отримання полів концентрацій, а розробка програмного забезпечення на основі архітектурних рішень для інтеграції з ГІС є ключовою для подолання її складності у використанні.

1.4. Аналіз програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику та його інтеграції з ГІС

Геоінформаційні системи, зародившись п'ять десятиліть тому, стали нині надзвичайно потужним інструментом не тільки для вивчення й моделювання просторової динаміки довкілля, а й прийняття обґрунтованих управлінських рішень у царині екологічного менеджменту та регіонального розвитку. Ці технології прикладні, а тому широко застосовувані для вирішення практичних завдань у напрямках обробки й аналізу даних екологічного моніторингу, візуалізації екологічної ситуації, дослідження просторової динаміки явищ і процесів, їх прогнозування.

За період з 1979 р. по 2021 р. було опубліковано 5204 наукових праць стосовно розвитку геоінформаційних технологій, що дає змогу ефективно збирати, аналізувати й візуалізувати просторові дані у екологічній сфері [5]. Збільшується цікавість застосування ГІС з метою моніторингу довкілля і його окремих компонентів, поширенню забруднень та несприятливих природних явищ, аналізу природокористування, використання інструментів дистанційного зондування [87].

ГІС забезпечують різноплановість досліджень, що дає змогу глибоко аналізувати і зрозуміти причини і вектори розвитку екологічних проблем, створювати тематичні карти, визначати особливо вразливі з точки зору дотримання екологічної рівноваги території, прогнозувати динаміку стану довкілля. Останнім часом в Україні зросла увага дослідників до нового напрямку, викликаного російською агресією на територію нашої країни, а саме застосування ГІС технологій в оцінках збитків і наслідків воєнних дій [73].

Світ побачила низка оглядових статей щодо застосування ГІС в оцінках екологічних процесів і динаміки навколишнього середовища. Автори праці [19] на основі ГІС розглядають екологічну динаміку за минулі тридцять років і ґрунтовно аналізують роль ГІС та дистанційного зондування в оцінках впливу природно-антропогенних чинників на природне середовище. Наголошується,

що застосовувані технології особливо ефективні при кількісній оцінці екологічних параметрів, ідентифікації їх одиничного і сукупного впливу, встановленні індикаторів, які відображають зміни або чинники тиску на довкілля. Підкреслено важливу роль ГІС та отриманих за їх допомогою даних, для цілей екологічного моніторингу та прийняття ефективних управлінських рішень.

Застосування ГІС і технологій дистанційного зондування забезпечує комплексний підхід до аналізу екологічних загроз, які спричинені дією тих чи інших чинників, важливості природоохоронних заходів і управлінських рішень, які сприятимуть попередженню негативної дії природно-антропогенних факторів та збереженню природних екосистем. Особливо стоїть питання застосування ГІС в управлінні місцями видалення відходів [121] та вибору оптимального місця будівництва полігонів ТПВ (тверді побутові відходи) [53]. Останнє продемонструвало ефективність поєднання ГІС, методів аналітичної ієрархії (АНР), простої адитивної ваги (SAW), просторового аналізу (ArcГІС 10.5.) для еколого-економічного обґрунтування планування міських відходів і забезпечення сталого розвитку міста. Застосування АНР у поєднанні з ГІС, технологіями RS, ArcГІС 10.5, QГІС 3.10, Google Earth Pro 7.3 та Google Earth Engine (GEE) стало дієвим для визначення оптимального розташування полігону ТПВ [63] і сприяє оптимізації процесу прийняття рішень у сфері управління відходами.

Таким чином, дистанційне зондування та геоінформаційні системи стали ключовими інструментами у моніторингу водних ресурсів, контролю якості повітря, ґрунтів, ландшафтів, природних і антропогенних екосистем. Застосування супутникових даних і безпілотних літальних апаратів (UAVs, БПЛА) дають змогу отримувати інформацію про стан довкілля в реальному часі [61], хоча головними проблемними моментами й надалі залишаються технічні обмеження використання БПЛА (низька тривалість автономної роботи), проблеми збереження та обробки великих обсягів інформації, імплементація інтелектуальних алгоритмів і штучного інтелекту, особливо

коли стосується використання біосенсорів для екологічного моніторингу та діагностики [71].

Особливо актуальними є геопросторові практики моніторингу забруднення повітря та прогнозування його поширення. Забруднення повітря є складною екологічною проблемою, яка загострюється через постійну урбанізацію, масову індустріалізацію, стрімке зростання населення та неконтрольоване використання природних ресурсів. З цією метою застосовують супутникові знімки атмосфери, високоточні сенсори та методи глибокого навчання, що значно розширюють можливості досліджень у цій галузі [15]. У низці досліджень знайшли відображення вивчення за допомогою ГІС моделювання просторової мобільності й трансформації забруднювачів повітря. У [47] ГІС використано для просторового аналізу забруднення повітря, платформа ArcГІС для побудови карт поширення концентрації забруднюючих речовин. Це дає змогу визначити зони з найвищими рівнями забруднення, ідентифікувати джерела викидів, простежити їх міграцію та вплив на якість атмосферного повітря. Відтак, вони є незамінним для аналізу змін урбаністичних процесів, їх моніторингу стану повітря та моделювання його якості в містах [47], за допомогою ГІС ефективно можна спостерігати за розвитком передмість та впливу цього процесу на стан і динаміку окремих компонентів природного середовища, зокрема водного [25]. ГІС в аналізі просторового розподілу шкідливих викидів використовують для візуалізації та аналізу концентрацій різноманітних політантів (PM₁₀, NO₂, CO) на основі геоданих з метою виявлення забруднених зон та визначення головних джерел викидів. ГІС з цією метою поєднують з математичним моделюванням в MATLAB (при врахуванні довгострокових тенденцій забруднення) [24]. Високу ефективність дослідження забруднення міського повітряного простору підтверджують результати, отримані [16], а моделюванню дифузії забруднюючих речовин на основі інтеграції ГІС для оцінки викидів в атмосферу в промислових зонах присвячені роботи [13].

Отож, ГІС довгі роки успішно застосовують для аналізу просторового розподілу забруднень, оцінки локалізації та інтенсивності джерел викидів у довкілля, а також уточнення і коригування топографічних даних, рельєфу тощо. Інтеграція ГІС з методами статистичного аналізу, моделями дисперсії дає змогу розуміти природу забруднення і його поширення на інших територіях. На основі таких поєднань автори [23] запропонували систему Hybrid Air Dispersion Exposure System (HADES), яка на основі моделювання дисперсії забруднень, супутникових даних та ГІС-методів проводить оцінку якості повітря на національному рівні, створює мапи концентрацій речовин, враховуючи рельєф, наявність забудови, локалізації джерел викидів.

Останнім часом актуалізувалися геопросторові дослідження поширення мікропластичних мас в довкіллі. На основі ГІС в урбанізованому прибережному середовищі (Сямень, Китай) було картографовано концентрації атмосферних мікропластиків (SAMPs), модельовано траєкторії повітряних мас, проведено аналіз впливу природно-антропогенних чинників на просторове поширення мікропластиків і поєднано отримані результати з атмосферним моніторингом [23]. Це дозволило виявити в урбанізованій зоні ареали підвищеного забруднення, що стало підґрунтям для розроблення комплексу заходів зі зменшення SAMPs у повітрі.

З метою оцінки просторового розподілу атмосферного мікропластику в місті Приштина (Косово) також застосовувалися ГІС [27], в тому числі платформи Urban Atlas 2018 (European Environment Agency) при встановленні типу земельного покриття та PCA (Principal Component Analysis) для ідентифікації взаємозв'язку між концентраціями і типом мікропластичних мас і різними ділянками за типом землекористування. Встановлено, що найбільша кількість мікропластику притаманна ділянкам з інтенсивним рухом транспорту і залежать від панівних повітряних мас.

У праці [34] на основі ГІС вивчено процеси розподілу, мікропластику та важких металів у природоохоронних зонах. Застосування методу крігінг-інтерполяції в ArcGIS 10.6, PMF-моделі разом із методами оцінки екологічної

загрози та здоров'я авторами розроблено концепцію моделі «джерело-накопичувач-джерело». Подібні дослідження стосуються гірських місцевостей як важливого реципієнта мікропластику за рахунок атмосферного переносу [56], просторово-часового розподілу і потенційних джерел мікропластику в атмосфері міського середовища [17]. Важливим є встановлення закономірностей транспортування мікропластиків у атмосфері. Так у праці [56] зроблено спробу на основі ГІС змодельовати розповсюдження і осідання мікропластику (МП) в атмосфері за допомогою розробленої моделі HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model). Для вивчення територіального переміщення атмосферного мікропластику було застосовано ArcГІС, що дозволило відстежити географічний розподіл забруднення та визначити вплив атмосферних факторів на процес осадження мікропластиків.

Значна частина статей спрямована безпосередньо на розробку платформ для ГІС. Так, [76] представляє розробку інструменту ArcГІС Toolbox для автоматизованої оцінки та картографування ерозії ґрунтів на водозборах гірських річок за допомогою методу Erosion Potential Method (EPM). ModelBuilder у середовищі ArcГІС полегшує обробку геоданих, скорочує витрати часу та необхідність глибоких знань ГІС. Такі інструменти корисні для прийняття рішень у сфері управління водозборами та планування інфраструктурних проєктів і мають потенціал для адаптації у відкритих ГІС-платформах, таких як QГІС.

Подальший розвиток ГІС орієнтується на використання рішень з відкритим кодом (OpenSource Shift). Одним з головних факторів цього є необхідність оптимізації витрат на геопросторові технології. Сучасне комерційне програмне забезпечення, наприклад ArcГІС і MapInfo, дороге, часто фінансово обтяжливе для невеликих організацій, державних установ та наукових закладів. Технології з відкритим кодом економічно вигідні, легкодоступні, динамічні в плані реалізації потенціалу безперервного інноваційного розвитку завдяки підтримці спільноти. Саме тому QГІС, GRASS ГІС, gvSIG та інші, забезпечуючи широкий спектр функціональних

можливостей без додаткових фінансових витрат, стають дедалі популярнішими в користувачів [65]. Крім того відкриті ГІС легко адаптуються й інтегруються з іншим програмним забезпеченням, що дає можливість користувачам пристосовувати ці інструменти до конкретних потреб [68]. Цей чинник забезпечив їх активне просування в академічній сфері, екологічному менеджменті та плануванні й реалізації інфраструктурних проєктів.

За даними [74] 74,19% останніх наукових робіт зосереджені на дослідження інтеграції відкритих компонентів у ГІС з імплементацією компонентів власної розробки. А зростаючий попит на відкриті дані та забезпечення сумісності між окремими системами зміцнює позиції ГІС з відкритим кодом. І причиною цього є можливість безперешкодної інтеграції між різними платформами та джерелами даних [16]. Більше того, часто надавачі інформації ставлять занадто жорсткі вимоги до безпеки даних і висувують такі ж правила щодо використання цієї інформації. Відтак все частіше урядові та приватні установи й організації роблять кроки для подолання надмірної залежності від зовнішніх постачальників інформації та їхніх технологій [45], віддаючи перевагу ГІС з відкритим кодом.

Траєкторія розвитку ГІС з відкритим кодом вказує на те, що вони відіграватимуть значну роль у формуванні майбутнього геопросторових технологій. Інші нові тенденції, такі як веб-ГІС, просторовий аналіз на основі штучного інтелекту і платформи для спільного використання даних, лише сприяють підтримці розробок із відкритим вихідним кодом [25].

Переорієнтація на ГІС з відкритим вихідним кодом є головним трансформаційним аспектом еволюції геопросторових технологій, а економічна доцільність, адаптивність і постійна підтримка спільноти роблять їх конкурентною альтернативою традиційним пропрієтарним ГІС. В міру того, як ГІС-інструменти з відкритим вихідним кодом ставатимуть все досконалішими і загальноприйнятими, їх значення у забезпеченні доступності даних, прийнятті рішень і просторовому аналізі невпинно

зростатиме. Це дасть змогу повною мірою реалізувати потенціал цих технологій і стати основою майбутньої геопросторової індустрії.

Іншим перспективним напрямком розвитку ГІС є інтеграція з мобільними та портативними технологіями (Integration with mobile, portable technologies and IOT). Ключовим чинником цього стала тенденція до зростання доступності мобільних ГІС-платформ. Вони дають змогу користувачам збирати та проводити аналіз просторових даних безпосередньо в польових умовах. Роль мобільних ГІС-платформ посилюється можливостями їх поєднання з розгортанням портативних мереж сенсорів, котрі з ними легко інтегруються. Датчики-сенсори часто розміщують на дронах, транспортних засобах, натільних пристроях, що дає змогу безперервно моніторити навколишнє середовище з високою просторовою роздільною здатністю [38]. На практиці широкого застосунку знайшли датчики з підтримкою GPS у поєднанні з ГІС-картографуванням задля аналізу просторових даних щодо стану повітря в режимі реального часу, визначення зон з підвищеними рівнями забруднення та розробки стратегій його скорочення. Так статичні мережі доповнюються переносними і мобільними сенсорними вузлами. Це дозволяє враховувати змінні умови, в яких збирається інформація. Для прикладу, багато досліджень зосереджена на зборі та обробці даних про дрібнодисперсні частинки в довкілля з використанням натільних датчиків. Самі пристрої різняться між собою розмірами, технічними характеристиками, проте, це дозволяє одночасно отримувати і акумулювати велику кількість інформації з великої кількості точкових даних [47]. Також така система може представляти собою портативний сенсорний пристрій [23], який швидко розгортається та підключається до мережі за допомогою технологій IoT. Його також можна інтегрувати в транспортні засоби і проводити мобільний моніторинг.

Цікавість до портативних пристроїв постійно зростає через широкую доступність апаратних платформ і датчиків. Зазвичай в їх основі лежать одноплатні комп'ютери типу Raspberry Pi або мікроконтролери різних сімейств, наприклад Arduino. Це дає дослідникам контролювати алгоритми

збору та обробки даних, а поєднання високої точності та надійності отриманої інформації з економічною вигодою від таких рішень спонукає до розробки власних портативних систем для моніторингу довкілля і долати залежність від сторонніх постачальників [49].

Варто зауважити, що така свобода має й свою ціну адже різноманітність портативних платформ, датчиків та алгоритмів збору даних потребує зусиль щодо адаптивного налаштування параметрів датчиків, стандартизації даних та подачі результатів. Але саме у інтеграції мобільних і портативних технологій в ГІС вбачається майбутнє просторового аналізу і моніторингу навколишнього середовища. Поширення датчиків з підтримкою GPS, натільних пристроїв моніторингу та систем збору даних на основі Інтернету речей суттєво розширює можливості ГІС.

Важливим напрямком розвитку технологій ГІС і програмного забезпечення є застосування штучного інтелекту (Leveraging Artificial Intelligence). Він стає незамінним у просторовому аналізі, моделюванні та ухваленні рішень на основі отриманих геоданих. Зростання потужності AI посилюватиметься його роль у ГІС шляхом автоматизації процесів. А це підвищить точність аналізу, особливо при роботі з великими обсягами геопросторових даних.

Саме сфера інтерпретації просторових даних і процесів моделювання є найперспективнішою для застосування AI в ГІС. Алгоритми глибокого навчання можуть використовуватися для різних завдань з вищою точністю, порівняно з традиційними методами, а моделі прогнозування на основі AI також дозволяють передбачати природні катастрофи, оптимізувати розподіл ресурсів і аналізувати кліматичні зміни, що перетворює ГІС на проактивний інструмент для ухвалення стратегічних рішень [58].

AI також підвищує ефективність систем підтримки прийняття рішень, даючи змогу ГІС обробляти геопросторові дані в режимі реального часу з кількох джерел одночасно. Це забезпечує швидкий аналіз ситуацій, точніше прогнозування та гнучкіші підходи до управління даними [27]. Поява

автономних ГІС, заснованих на великих мовних моделях і автоматизації на основі AI, зробить ГІС-інструменти інтуїтивно зрозумілішими і доступнішими як для широкого загалу користувачів, так і для управлінської ланки, розширюючи їх можливості прийняття обґрунтованих рішень. Такі платформи дозволять здійснювати складний аналіз без глибоких технічних знань у різних галузях та сферах діяльності [46].

Проте ГІС, керовані AI, мають серйозні проблеми з якістю даних, інтерпретованістю моделей та обчислювальними вимогами, оскільки багато моделей AI працюють як «чорні скриньки». Це є визначальним у багатьох тих сферах, які вимагають прозорості та звітності [64]. Часто наголошується на непрозорості процесу ухвалення рішень штучним інтелектом, існує великий ризик дезінформації. AI-моделі здатні генерувати високоточні результати, але не надавати зрозумілих їх пояснень і обґрунтувань, а тому висновки можуть вводити в оману користувачів, особливо в критично важливих сферах, в тому числі й екологічному моніторингу. Для мінімізації таких ризиків, потрібні ефективні механізми верифікації результатів і людський нагляд. Тільки це гарантує, що ГІС, які використовують AI, будуть надійним інструментом для ухвалення обґрунтованих рішень [26].

У майбутньому розвиток AI продовжить формувати зміни у ГІС в напрямках удосконалення геопросторового аналізу, автоматизації та обробці даних у реальному часі. Інновації в інтеграції геопросторових даних, навчанні з підкріпленням і генеративних AI-моделях розширюватимуть потенціал ГІС, що дасть змогу точніше картографувати явища та процеси, автоматизувати аналіз, прогнозувати розвиток процесів та забезпечити ефективніше, а в окремих випадках повністю автономне, прийняття рішень.

Отже, аналіз програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику показав його орієнтованість на інтеграцію з ГІС, що забезпечує ефективне використання даних про метеоумови, ландшафт та візуалізацію даних.

1.5. Постановка завдання дослідження

Мікропластик є глобальною екологічною проблемою, яка набуває все більшого значення у наукових дослідженнях. Його поширення зачіпає всі компоненти навколишнього середовища, включаючи атмосферу, водні та наземні екосистеми. Основними джерелами мікропластичних частинок є антропогенні забруднення, що виникають внаслідок промислової діяльності, транспорту, сільського господарства та побутових відходів. Проте механізми його поширення залишаються недостатньо вивченими, що ускладнює розробку ефективних стратегій управління цим типом забруднення.

Значна кількість досліджень зосереджена на моніторингу мікропластику у водних екосистемах, однак його переміщення в атмосфері та накопичення у придорожніх, промислових і сміттєвих зонах потребують подальшого аналізу. Складність проблеми полягає у тому, що мікропластик представлений частинками різних розмірів, хімічного складу та фізичних властивостей, що впливає на його здатність до транспортування та осадження. Крім того, чинники середовища, такі як вітер, вологість, температура та кліматичні умови, значно впливають на характер поширення цих частинок.

Для розуміння процесів поширення мікропластику та його впливу на екосистеми необхідно розробити математичні моделі, що дозволять прогнозувати його рух та накопичення у навколишньому середовищі. Такі моделі дадуть змогу оцінити:

- вплив фізичних та кліматичних факторів на поширення мікропластику в атмосфері;
- особливості акумуляції мікропластику у придорожніх екосистемах;
- накопичення мікропластику у зоні впливу полігонів твердих побутових відходів;
- розподіл мікропластику у зонах промислового забруднення.

Одним із найменш досліджених аспектів є поширення мікропластику через атмосферу. Вітрові потоки можуть переносити дрібнодисперсні

частинки на значні відстані, що призводить до їхнього осадження у різних ландшафтах. Вплив атмосферних опадів, температурних змін та аеродинамічних характеристик частинок суттєво визначає, де саме буде накопичуватися мікропластик. Математичне моделювання цих процесів дозволить ідентифікувати закономірності розсіювання мікропластику у повітрі та оцінити потенційні зони підвищеного забруднення.

Автомобільний транспорт є одним із ключових джерел мікропластичних забруднень. Зношування автомобільних шин і дорожнього покриття спричиняє викид значної кількості мікропластичних частинок у повітря, які осідають уздовж автомагістралей та потрапляють у ґрунт і водні об'єкти. Придорожні екосистеми, зокрема рослинність, можуть акумулювати ці частинки, що впливає на їх біологічні функції та біохімічні цикли. Математична модель поширення мікропластику в придорожніх зонах дозволить встановити основні закономірності розподілу забруднення та оцінити його вплив на природні екосистеми.

Полігони ТПВ є одними з основних джерел вторинного мікропластику. В результаті механічного руйнування макропластикових відходів, впливу ультрафіолетового випромінювання та хімічної деградації утворюються дрібні частинки, які можуть потрапляти у ґрунти, води та атмосферу. Вітрова ерозія сприяє перенесенню цих частинок на значні відстані, що ускладнює контроль за рівнем забруднення. Створення математичної моделі поширення мікропластику у таких зонах допоможе оцінити масштаби забруднення та ефективність заходів із мінімізації впливу полігонів на довкілля.

Промислові підприємства є значним джерелом мікропластичних забруднень, оскільки їх діяльність пов'язана з використанням синтетичних полімерів, виробництвом пластмас та їх вторинною переробкою. Викиди мікропластику в таких районах можуть відбуватися через атмосферу, водні скиди та відходи виробництва. Через високу концентрацію промислових підприємств у певних регіонах необхідно розробити модель, що дозволить

оцінити просторову динаміку забруднення, встановити зв'язок між джерелами емісії та зонами акумуляції мікропластичних частинок.

Незважаючи на актуальність проблеми, існуючі підходи до моделювання атмосферного поширення МП мають суттєві обмеження. Застосування спрощених моделей (напр., Гаусового типу) не дозволяє адекватно врахувати ключові фізичні процеси, що визначають долю частинок МП в атмосфері, зокрема, їхнє осідання залежно від розміру, форми та щільності. З іншого боку, використання більш фізично обґрунтованих моделей (напр., на основі рівнянь адвекції-дифузії-реакції – АДР) стикається з проблемами високої обчислювальної складності, потреби у великих обсягах деталізованих вхідних даних та, що особливо важливо для практичного застосування, відсутністю ефективних та гнучких механізмів їх інтеграції з геоінформаційними системами. ГІС є стандартом де-факто для збору, зберігання, аналізу та візуалізації просторових екологічних даних, однак існуючі методи зв'язування ГІС зі складними зовнішніми моделями часто є незручними, неефективними або недостатньо гнучкими. Відсутні комплексні програмні рішення та обґрунтовані архітектури, які б забезпечували безшовну інтеграцію АДР-моделей поширення МП (адаптованих для різних типів джерел – точкових, площинних, лінійних) та необхідний функціонал ГІС, автоматизуючи процеси підготовки даних, побудови моделей, їх налаштування та візуалізації результатів для підтримки прийняття рішень.

Таким чином, виникає протиріччя, яке полягає у невідповідності між нагальною потребою в точних інструментах для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери та недостатнім розвитком як самих математичних моделей, що враховують специфіку МП, так і, особливо, ефективних архітектурних рішень для їхньої тісної та гнучкої інтеграції з ГІС. Невирішеними залишаються питання розробки та адаптації АДР-моделей для МП від різних типів антропогенних джерел, створення методів їх налаштування за обмеженими даними моніторингу, та, головне, обґрунтування

та реалізації програмної архітектури, що забезпечує зручну та ефективну взаємодію цих моделей з ГІС для комплексного екологічного аналізу.

Вирішення цієї науково-прикладної задачі потребує проведення дисертаційного дослідження, спрямованого на розробку комплексу математичних моделей поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери та створення науково обґрунтованих архітектурних рішень для їхньої інтеграції в геоінформаційні системи, що й визначає основну задачу даної роботи.

Для розв'язання цієї задачі необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз проблеми забруднення приземного шару атмосфери мікропластиком, виявити основні джерела та механізми його поширення в атмосфері, а також оглянути існуючі методи моніторингу та математичного моделювання цього процесу, включаючи роль ГІС в екологічних дослідженнях;
- обґрунтувати та розробити метод моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери, що базується на рівнянні адвекції-дифузії-реакції, та метод налаштування його параметрів на основі методів оптимізації;
- розробити комбінований метод визначення інтервальних оцінок вмісту мікропластику в пробах атмосферного повітря для отримання даних, необхідних для побудови, налаштування та верифікації математичних моделей;
- розробити алгоритмічне забезпечення для реалізації запропонованих методів моделювання;
- розробити комплекс математичних моделей поширення мікропластику від ключових типів антропогенних джерел: точкових, лінійних та площинних;
- розробити архітектурні рішення та реалізувати програмне забезпечення на основі розроблених методів і математичних моделей із використанням геоінформаційних систем.

Висновки до розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз проблеми забруднення довкілля мікропластиком, огляд сучасного стану методів моніторингу та моделювання його поширення, а також програмного забезпечення, яке може інтегрувати функціонал геоінформаційних систем. Аналіз дозволив сформулювати такі висновки:

1. Забруднення мікропластиком є глобальною екологічною проблемою, що характеризується повсюдним поширенням пластикових частинок у всіх компонентах довкілля, зокрема в приземному шарі атмосфери. Встановлено, що основними джерелами МП є промислові процеси, зношення шин та дорожнього покриття, розкладання пластикових виробів, а також агротехнічна діяльність. Атмосферне перенесення забруднення визначено як один із ключових механізмів поширення МП, складність якого зумовлена широким діапазоном фізико-хімічних властивостей частинок (розмір, форма, щільність).

2. Аналіз існуючих методів моніторингу МП у довкіллі (атмосфері, воді, ґрунтах) показав наявність різноманітних методик відбору проб та їх лабораторного аналізу (візуальна ідентифікація, мікроскопія, спектроскопія). Однак виявлено суттєві недоліки: відсутність уніфікованих та стандартизованих протоколів, висока трудомісткість та вартість аналізів (особливо для ідентифікації малих частинок та полімерного складу), що обмежує можливість проведення масштабних та регулярних програм моніторингу. Існує гостра потреба у розробці більш ефективних, зокрема комбінованих та експресних, методів кількісної оцінки МП.

3. Огляд методів математичного моделювання поширення МП підтвердив їхню важливість для розуміння процесів та прогнозування забруднення. Встановлено, що застосування спрощених моделей (напр., Гаусових) є недостатньо обґрунтованим через нездатність адекватно враховувати процеси осідання МП. Більш складні моделі (адвекційно-дифузійні – АДР, Лагранжеві) враховують фізичні властивості мікропластичних частинок та процесу

поширення, але потребують значних обчислювальних ресурсів, детальних вхідних даних та специфічної адаптації для врахування властивостей МП. Залишається актуальною задача побудови та верифікації моделей, адаптованих для МП та різних типів джерел.

4. Аналіз програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику показав широке використання його інтеграції з ГІС для збору, управління, аналізу та візуалізації просторових екологічних даних. Проте, потенціал ГІС для інтеграції зі складними моделями поширення забруднень, такими як АДР чи Лагранжеві моделі для МП, реалізований недостатньо. Існуючі підходи до інтеграції часто є негнучкими, вимагають значних ручних операцій або спеціалізованих навичок, що обмежує їх практичне використання екологами та управлінцями. Це обумовлює необхідність розробки програмного забезпечення, яке б інтегрувало комплекс математичних моделей та необхідний функціонал ГІС для ефективного моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери в умовах малих вибірок даних вимірювань.

5. На основі проведеного аналізу обґрунтовано постановку задачі дисертаційного дослідження. Обґрунтовано потребу в сучасних інструментах для оцінки та прогнозування поширення МП, яка обумовлена відсутністю комплексних, адаптованих математичних моделей та ефективних архітектурних рішень для їхньої гнучкої інтеграції з ГІС. Необхідність розробки таких моделей та архітектурних рішень визначає основні завдання даної дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ В ПРИЗЕМНОМУ ШАРІ АТМОСФЕРИ

Проблема забруднення атмосферного повітря мікропластиком набуває все більшої актуальності, враховуючи його потенційний вплив на екосистеми та здоров'я людини. Як було досліджено у першому розділі, розуміння процесів поширення мікропластику у приземному шарі атмосфери є ключовим для оцінки масштабів забруднення, визначення джерел та прогнозування його подальшого поширення. Цей розділ дисертаційної роботи присвячено розробці та застосуванню комплексу методів, спрямованих на моніторинг та моделювання поширення мікропластику у безпосередній близькості до земної поверхні.

З метою кількісної оцінки просторово-часової динаміки розповсюдження мікропластику, у параграфі 2.1 детально описується розроблений метод математичного моделювання, що базується на фундаментальному рівнянні адвекції-дифузії-реакції. Цей підхід дозволяє врахувати основні фізичні процеси, що визначають поширення мікропластику, включаючи його поширення повітряними потоками, турбулентне розсіювання та процеси видалення з атмосфери за рахунок сухого та вологого осадження.

Для забезпечення верифікації результатів моделювання необхідним є проведення натурних досліджень. У зв'язку з цим, у параграфі 2.2 представлено комбінований метод ідентифікації МП у приземному шарі атмосфери, що поєднує етап відбору проб повітря з подальшим фізико-хімічним аналізом зібраних частинок. Описано ключові етапи розробленої методики, включаючи вибір оптимальних методів пробовідбору, підготовку зразків та застосування сучасних інструментальних технік для ідентифікації полімерного складу та характеристик мікропластику. Ефективність математичної моделі значною мірою залежить від точності визначення її параметрів, зокрема коефіцієнтів адвекції, дифузії та реакції. У параграфі 2.3

представлено розроблений метод адаптивного налаштування параметрів моделі, що базується на оптимізації зазначених коефіцієнтів шляхом мінімізації відхилення між модельованими прогнозами та експериментальними даними, отриманими в результаті застосування комбінованого методу ідентифікації МП. Описано вибір критеріїв оптимізації та застосування відповідних чисельних методів.

На завершення розділу, у параграфі 2.4, представлено алгоритмічне забезпечення, розроблене для реалізації запропонованих методів моделювання поширення мікропластику. Описано структуру розроблених програмних модулів, їхню взаємодію та функціональні можливості, що забезпечують автоматизацію процесів обробки експериментальних даних, чисельного розв'язання рівняння адвекції-дифузії-реакції та проведення адаптивного налаштування моделі.

Таким чином, цей розділ закладає методологічну основу дисертаційної роботи, представляючи комплекс взаємопов'язаних методів, що дозволяють здійснювати як експериментальне дослідження, так і математичне моделювання процесів поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери, з подальшою можливістю їхньої верифікації та прогнозування.

Основні результати досліджень по опубліковано в працях [81, 159, 160].

2.1. Метод моделювання поширення мікропластику на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції

Розглянемо особливості, які підтверджують ефективність використання рівняння адвекції-дифузії-реакції (АДР) для моделювання переносу мікропластику в приземному шарі атмосфери

Адвекційно-дифузійні моделі широко застосовуються для опису розповсюдження аерозолів, пилу та інших забруднювачів. Рівняння АДР є стандартним інструментом для моделювання розповсюдження різноманітних домішок та забруднювачів в атмосфері. Його структура дозволяє комплексно

описати вплив переносу, змішування та перетворень (або видалення) на концентрацію речовини в атмосфері. Враховуючи фізичну природу мікропластику як твердих частинок, що піддаються впливу вітру, турбулентності та осадження, застосування цього рівняння є логічним та обґрунтованим.

Існуючі дослідження та моделі підтверджують ефективність підходів, заснованих на принципах АДР, для моделювання поширення мікропластику. Дослідження показують, що моделі, які включають адвекцію, дифузію та процеси осадження, успішно описують перенесення мікропластику на великі відстані. Аналіз наукової літератури [23, 67, 93] підтверджує, що підхід, який базується на рівнянні АДР, є релевантним та широко використовується в дослідженнях атмосферного поширення мікропластику.

Моделювання переносу мікропластику вимагає врахування трьох основних механізмів, які безпосередньо відповідають компонентам рівняння АДР:

- перенесення мас повітря, переважно вітром, є основним механізмом горизонтального перенесення мікропластику. Цей процес відповідає адвективному члену рівняння АДР;
- турбулентні потоки в приземному шарі атмосфери спричиняють хаотичне перемішування частинок мікропластику як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. Це відповідає дифузійному члену рівняння АДР, який описує розсіювання речовини через випадкові рухи;
- процеси видалення мікропластику з атмосфери, такі як сухе (гравітаційне осадження) та вологе (з опадами) осадження, є ключовими для визначення часу перебування частинок у повітрі та зон їх накопичення. Ці процеси відповідають реакційному члену рівняння АДР, що моделює зміни концентрації через процеси, відмінні від переносу (в даному випадку – осадження).

Однак, хоча рівняння АДР є потужним інструментом, для точного моделювання мікропластику необхідно враховувати фізичні властивості цих

частинок та невизначеності. Зокрема, можна виділити такі напрями вдосконалення існуючих методів:

- різноманітність розмірів та форм мікропластику суттєво впливає на аеродинамічні властивості, зокрема на швидкість осадження (реакційний член) та взаємодію з турбулентними потоками (дифузійний член);
- точне визначення швидкостей сухого та вологого осадження є складним завданням і залежить від багатьох факторів (розмір частинок, метеоумови, взаємодія з атмосферою);
- різні джерела (зношення шин, гальм, полігони ТПВ) генерують мікропластик з різними властивостями, що впливає на початкові умови та параметри моделювання;
- існує певна невизначеність та дискусії щодо точних значень коефіцієнтів дифузії та швидкостей осадження для різних типів мікропластику, що вимагає подальших досліджень для уточнення параметрів моделі.

Отже, рівняння адвекції-дифузії-реакції є фундаментально обґрунтованим інструментом для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери, оскільки воно математично описує ключові фізичні процеси (перенос вітром, турбулентне перемішування, осадження), що впливають на це явище. Його застосування підтверджується як загальною практикою в атмосферній науці, так і конкретними дослідженнями транспорту мікропластику. Однак для досягнення високої точності моделювання необхідно ретельно враховувати фізичні властивості мікропластику (розмір, форму) та розробити методи для параметрів моделі, особливо пов'язаних з процесами осадження та дифузії.

Із врахуванням зазначеного вище, використаємо рівняння адвекції-дифузії-реакції у такому вигляді [160]:

$$\frac{dC(x, y, z, t)}{dt} + v_x \cdot \frac{dC(x, y, z, t)}{dx} +$$

$$\begin{aligned}
& + v_y \cdot \frac{dC(x, y, z, t)}{dy} + (v_z - v_s) \cdot \frac{dC(x, y, z, t)}{dz} - \\
& - D_x \cdot \frac{d^2 C(x, y, z, t)}{d^2 x} - D_y \cdot \frac{d^2 C(x, y, z, t)}{d^2 y} - \\
& - D_z \cdot \frac{d^2 C(x, y, z, t)}{d^2 z} + \lambda \cdot C(x, y, z, t) = S(x, y, z, t), (2.1)
\end{aligned}$$

де

$C(x, y, z, t)$ – концентрація забруднюючої речовини в точці з координатами x, y, z в момент t , г/м³,

v_x, v_y, v_z – компоненти швидкості вітру в напрямках x, y, z , м/с,

v_s – швидкість осадження, яка розраховується в межах 0.001-0.1 м/с в залежності від розміру частинок;

D_x, D_y, D_z – коефіцієнти турбулентної дифузії у відповідних напрямках, [м²/с],

λ – коефіцієнт осадження, що залежить від вологості та опадів, [од/с];

$S(x, y, z, t)$ – джерело викидів мікропластику, яке описується як:

$$S(x, y, z, t) = Q \cdot \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0, t - t_0), \quad (2.2)$$

де

Q – інтенсивність викидів мікропластику, м³/с або мг/с;

δ – функція Дірака;

x_0, y_0, z_0 – координати джерела викидів;

t_0 – момент часу, коли відбувається викид.

На рис. 2.1 наведено графічне представлення поширення концентрації в часі на заданій відстані, яке моделюється на основі одновимірного випадку рівняння (2.1) та граничних умов Діріхле, що відповідає постійному джерелу забруднення із заданою концентрацією та граничним умовам з нулевою концентрацією на межі області.

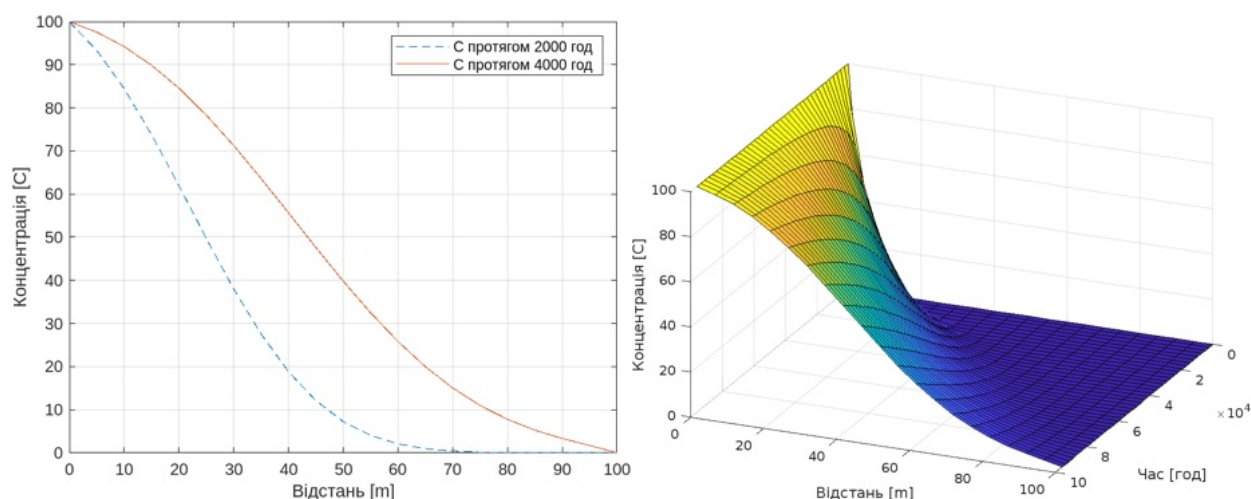


Рис. 2.1. Ілюстрація формування кривої поширення забруднення в часі від постійного джерела на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції

Врахування осадження в якості компоненти реакції дозволяє адаптувати ці моделі для мікропластику, що має специфічні фізичні характеристики:

- адвекція (перенесення потоком повітря). Адвекційний компонент у рівнянні дозволяє описати горизонтальне (уздовж осей x та y) і вертикальне (z) перенесення частинок відповідно до напрямку та швидкості вітрових потоків;

- дифузія (турбулентне перемішування). В атмосферних умовах поширення мікропластику супроводжується хаотичними турбулентними рухами. Дифузійні члени у рівнянні враховують цей механізм і визначають, наскільки швидко частинки розсіюються у просторі. У приземному шарі ($z \leq h$) коефіцієнти дифузії можуть визначатися за такими формулами [1.2]:

$$D_x = D_0 + k_0 \cdot u(z), \quad (2.3)$$

$$D_y = D_x, \quad (2.4)$$

$$D_z = D_0 + D_1 \cdot (z/z_1)^m, \quad (2.5)$$

де

$k_0 = 0.1, \dots, 1$ м;

$m = 0.8 - 1.2$ в залежності від сталості атмосфери;

D_0 – коефіцієнт молекулярної дифузії;

D_1 – коефіцієнт турбулентної дифузії на висоті $z = z_1$, що зазвичай складає $0.1 - 0.2$ м²/с.

Сухе осадження мікропластику відбувається за рахунок гравітаційного осідання, інерційного зіткнення та зчеплення. Вологе осадження включає захоплення частинок опадами та підвищеною вологістю. Розглянемо детальніше як ці процеси описуються в рівнянні адвекції-дифузії-реакції.

Седиментація (сухе (гравітаційне) осадження частинок).

Частинки мікропластику мають певну масу, що призводить до їх поступового осадження під дією сили тяжіння. Сухе осадження МП значною мірою залежить від розміру та форми частинок, характеристик поверхні землі, поверхневих вітрів і стратифікації атмосфери. Сухе осадження атмосферних частинок контролюється комбінацією сухого осадження (тобто гравітаційного осадження) та поверхневого опору (або ефективності захоплення). Сухе осадження відбувається, коли частинки рухаються вниз у повітряному стовпі під впливом сили тяжіння, плавучості, сил опору та низхідних векторів вітру. Поверхневий опір осадженню залежить від аеродинамічних умов поблизу поверхні осадження та від взаємодії між частинками, що осідають, поверхнею та поверхневими вітрами. Цей процес описується терміном v_s (швидкість осадження), який залежить від розміру, щільності частинок та в'язкості повітря. Швидкість сухого осадження (v_s , у м/с) можна оцінити за термінальною швидкістю сухого осадження (v_g), аеродинамічним опором осадженню (R_a) та поверхневим опором осадженню (R_s) за такою формулою:

$$v_s = v_g + \frac{1}{(R_a + R_s)}. \quad (2.6)$$

У свою чергу, v_g залежить від розміру, форми, щільності частинок та відповідної динаміки рідини (ламінарної чи турбулентної) через комбінацію

сил тяжіння, плавучості та опору в навколишньому повітрі. Різні діапазони розмірів частинок вимагають використання різних рівнянь осадження: Ньютона, Стокса або броунівського, оскільки різні механізми впливають на поведінку частинки залежно від її розміру. Осадження великих частинок найкраще описується рівнянням Ньютона, яке враховує масу та гравітаційні сили, оскільки інерція рідини стає значною, а сила тяжіння домінує в осадженні:

У режимі Ньютона кінцева швидкість (v_g) для сухого осідання сферичних частинок розраховується за формулою:

$$v_g = \sqrt{\frac{4d_p g (\rho_p - \rho)}{3C_D \rho}}, \quad (2.7)$$

де

d_p – діаметр частинки мікропластику;

g – гравітаційна стала;

ρ – густина рідини (в даному випадку повітря);

ρ_p – густина частинки;

C_D – коефіцієнт опору, який є безрозмірною величиною, яка залежить від форми частинки, розподілу потоку, орієнтації та проникності.

Типи потоків визначаються числом Рейнольдса. Існує ламінарний потік із числом Рейнольдса нижче одиниці та турбулентний потік, що характеризується високим числом Рейнольдса. Між ламінарним і турбулентним режимами існує перехідний режим, для якого потрібна кореляція для розрахунку C_D . У перехідному режимі в літературі представлено численні кореляції опору для сферичних частинок. На основі недавніх експериментальних даних для сферичних частинок було визначено, що кореляція, запропонована Калманом і Матана (таблиця 2.1), є найбільш відповідною для перехідного режиму. Тому ця кореляція використовується як стандартний коефіцієнт опору для сферичних частинок у цьому дослідженні.

У режимі Стокса ($16.7 \text{ мкм} < dp \leq 75.75 \text{ мкм}$) визначальною є сила в'язкого опору на поверхні частинки. Згідно із законом Стокса, кінцева швидкість (v_g) для сухого осадження частинок розраховується за формулою:

$$v_g = \frac{g}{18\mu} (\rho_p - \rho) d_p^2, \quad (2.8)$$

де

μ – в'язкістю рідини (повітря).

Таблиця 2.1.

Коефіцієнт опору у різних типах потоку

Тип потоку	Число Рейнольдса, Re	Коефіцієнт опору, C_D
Ламінарний	$Re < 1$	$C_D = \frac{24}{Re}$
Перехідний	$1 < Re < 1000$	$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{5}{Re^{0.6}} + 0.44$
Турбулентний	$1000 < Re < 2 \cdot 10^5$	~ 0.44
Турбулентний	$2 \cdot 10^5 < Re$	0.10

Закон Стокса застосовується до сферичних, гладких і твердих частинок у ламінарному потоці ($Re < 1, dp < 50 \text{ мкм}$), без взаємодії з іншими частинками (розріджені суспензії), з однорідною густиною, у безперервному рідинному середовищі.

Коли частинки досить малі, щоб бути розміром на рівні або нижче середньої довжини вільного пробігу рідини (відстань, яку молекула рідини проходить перед зіткненням із сусідніми молекулами рідини), цю рідину більше не можна вважати безперервним середовищем. Середня довжина вільного пробігу в сухому повітрі становить 66 нм при 23 °C і 1 атм. У цьому випадку встановлюють броунівський режим для якого застосовують коефіцієнт корекції Каннінгема (C_c), який дозволяє прогнозувати кінцеву швидкість (v_s) малих частинок у середовищі (повітрі):

$$v_s = v_g \cdot C_c, \quad (2.9)$$

де C_c – коефіцієнт корекції Каннінгема [123].

Фізика сухого осадження МП подібна до фізики інших аерозолів, таких як мінеральний пил або пилок. Проаналізуємо режими використання формул (2.7)-(2.8) в залежності від розміру МП та зовнішніх умов, що визначаються числом Рейнольдса частинки, Re_p та коефіцієнтом корекції Каннінгема (рисунки 2.3, 2.4).

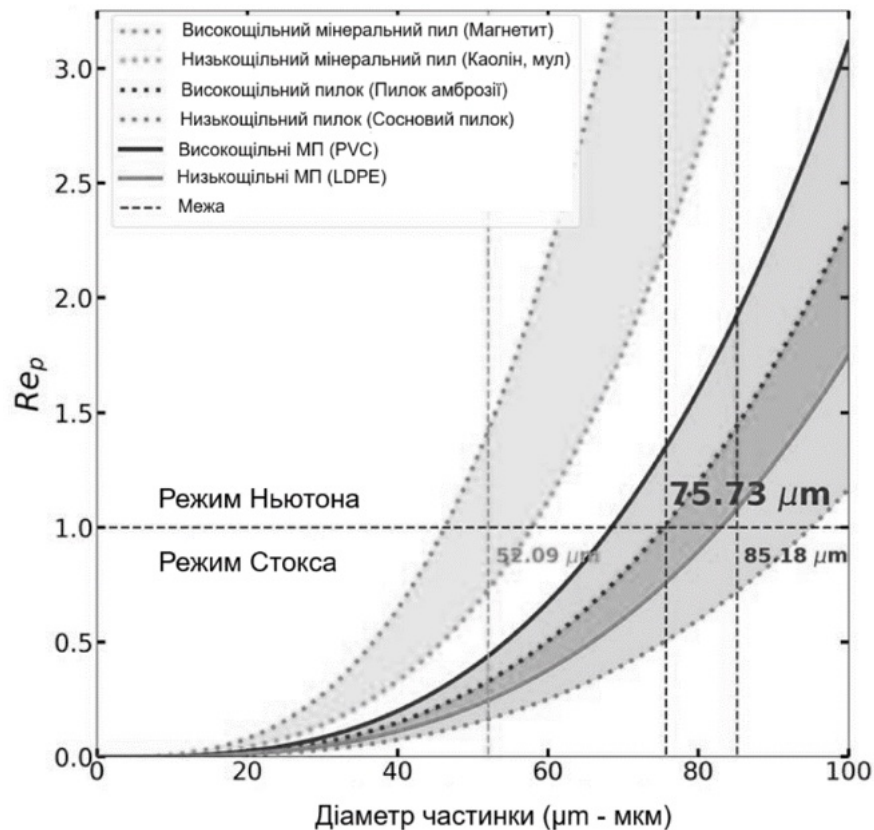


Рис. 2.3. Сухе осідання МП у повітрі: межі режимів Ньютона та Стокса

Межі між режимами Ньютона та Стокса наведено на рисунку 2.3. Даний рисунок показує, як число Рейнольдса частинки (Re_p) змінюється залежно від діаметра частинки для МП, мінерального пилу та пилку в різних діапазонах щільності. Лінія $Re_p = 1.0$ позначає поріг між режимами Ньютона та Стокса. Синя заштрихована область відповідає щільності МП (900-1600 kg/m^3 , що відповідає LDPE та PVC відповідно) з перехідною межею з діаметром 75.73 мкм. Для порівняння, мінеральний пил (жовтий, 2000-5000 kg/m^3 , каолініт і магнетит відповідно) має перехідну межу з діаметром 52.09 мкм, а пилок

(зелений, 600-1200 кг/м³, сосновий пилок і пилок амброзії відповідно) – 85.18 мкм.

Межу між броунівським і Стоксовим режимами наведено на рис. 4.. Зміна коефіцієнта корекції Каннінгема (C_c) як функції від діаметра частинок. Коефіцієнт корекції Каннінгема необхідний для частинок < 16.7 мкм, щоб похибка залишалася нижче 1%, що визначає межу між броунівським і Стоксовим режимами.

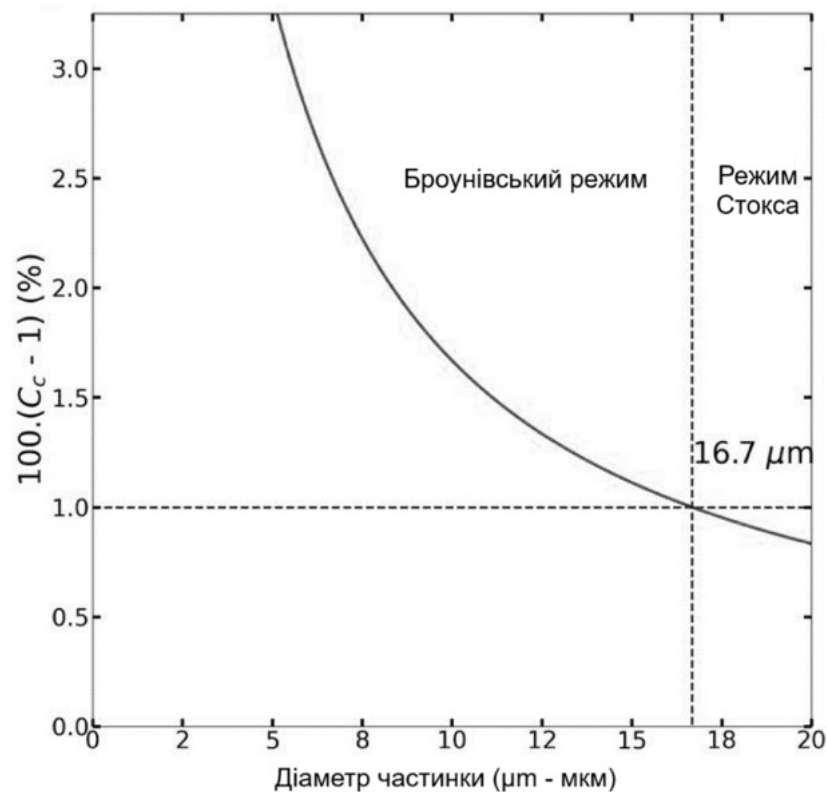


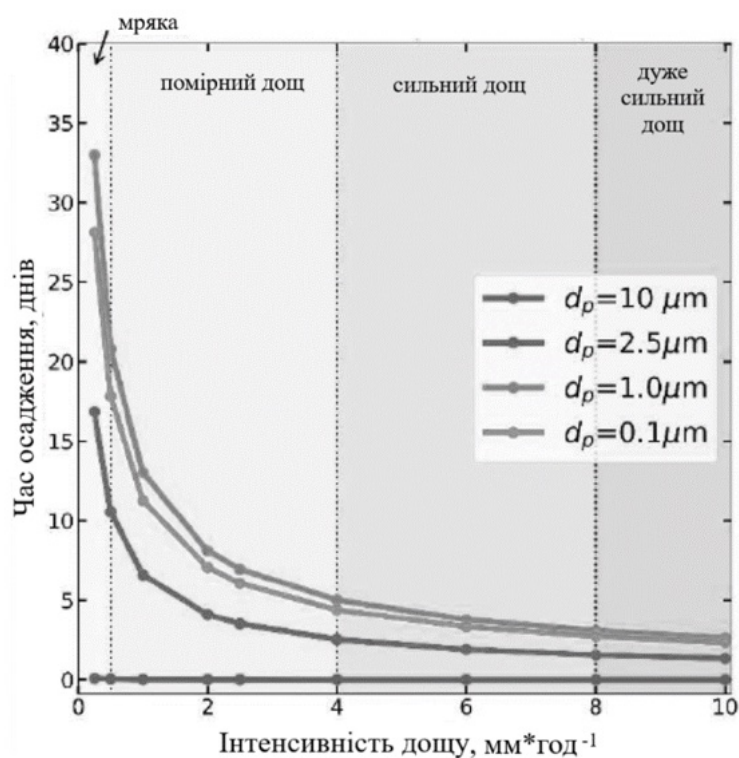
Рис. 2.4. Сухе осідання МП у повітрі: межі режимів броунівського та Стокса

Згідно експериментальних досліджень для частинок розміром $1 < r < 10$ мкм швидкість осадження складає $0.001 < v_s < 0.1$ м/с.

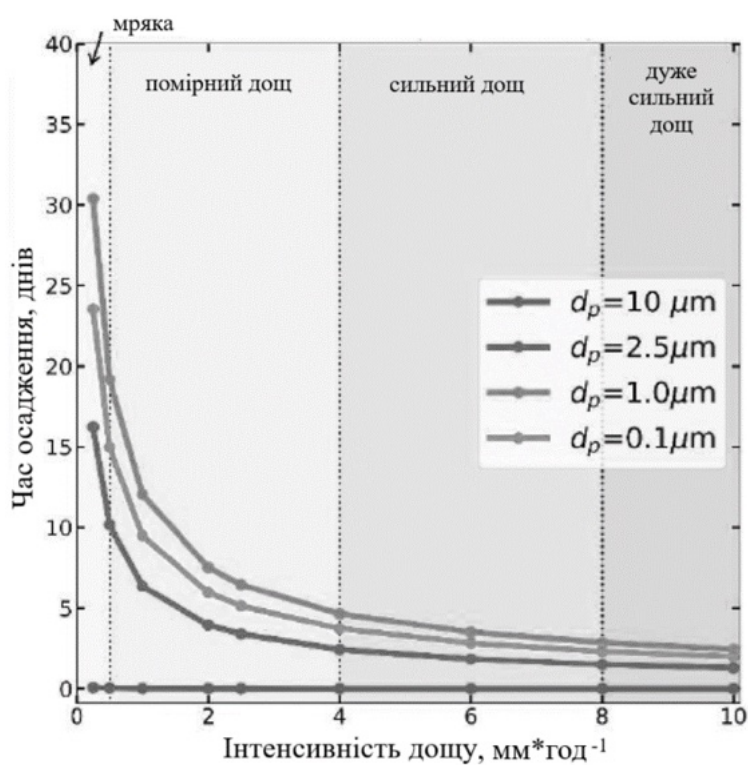
Вплив атмосферних умов або вологе осадження (осадження через дощ, вологість).

Дощові опади значно впливають на концентрацію мікропластику в повітрі, оскільки частинки захоплюються краплями води та осідають на поверхню. Вплив інтенсивності опадів на період осадження мікропластику в атмосфері є досить дослідженим [85]. Період осадження мікро- та

нанопластиків (МНЧ) різного діаметра (0.1 мкм, 1.0 мкм, 2.5 мкм, 10 мкм) в атмосфері заввишки 1 км продемонстровано на рис. 2.5.



а)



б)

Рис. 5. Вплив інтенсивності опадів на період осадження МП в атмосфері: а) LDPE (поліетилен низької щільності), б) PVC (полівінілхлорид)

Дослідження проводилися за різної інтенсивності дощу (RI), де рівномірний діаметр крапель дощу D_p для кожної інтенсивності дощу розраховується за формулою:

$$D_p = 0.97 \cdot 10^{-3} (RI \cdot 0.158) \quad (2.10)$$

Класифікація інтенсивності дощу та відповідні діаметри крапель наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Класифікація інтенсивності дощу

Тип дощу	Інтенсивність	Діаметр крапель
Мряка	$RI < 0.5$ мм/год	$D_p = 0.87$ мм
Помірний дощ	$0.5 \text{ мм/год} < RI < 4 \text{ мм/год}$	$D_p = 1.10$ мм
Сильний дощ	$4 \text{ мм/год} < RI < 8 \text{ мм/год}$	$D_p = 1.35$ мм
Дуже сильний дощ	$RI > 8$ мм/год	$D_p = 1.40$ мм

Тенденції періодів осадження для LDPE і PVC в залежності від розміру можна охарактеризувати таким чином:

а) LDPE (щільність $\sim 900\text{--}930$ кг/м³):

- 0.1 мкм. У мряці період осадження може становити кілька днів (наприклад, 2–3 дні) через повільне вимивання. У дуже сильному дощі він може скоротитися до годин (наприклад, 4–6 годин), оскільки захоплення через дифузію стає ефективнішим із вищим потоком крапель.

- 1.0 мкм. Період осадження зменшується з $\sim 1\text{--}2$ днів у мряці до $\sim 2\text{--}4$ годин у дуже сильному дощі, оскільки діють як дифузія, так і перехоплення.

- 2.5 мкм. Період осадження коливається від $\sim 12\text{--}24$ годин у мряці до $\sim 1\text{--}2$ годин у дуже сильному дощі, при цьому імпація стає більш значущою.

- 10 мкм. Період осадження коротший через швидше гравітаційне осідання та імпацію, коливаючись від $\sim 6\text{--}12$ годин у мряці до $\sim 30\text{--}60$ хвилин у дуже сильному дощі.

б) PVC (щільність $\sim 1380\text{--}1600 \text{ кг/м}^3$):

- 0.1 мкм. Подібно до LDPE, оскільки щільність має мінімальний вплив на цьому розмірі (броунівський режим). Період осадження коливається від $\sim 2\text{--}3$ днів у мряці до $\sim 4\text{--}6$ годин у дуже сильному дощі.

- 1.0 мкм. Трохи коротший, ніж у LDPE, через вищу щільність, коливаючись від $\sim 1\text{--}2$ днів у мряці до $\sim 2\text{--}3$ годин у дуже сильному дощі.

- 2.5 мкм. Період осадження коливається від $\sim 10\text{--}20$ годин у мряці до $\sim 1\text{--}1.5$ годин у дуже сильному дощі, трохи коротший, ніж у LDPE, через швидше осідання.

- 10 мкм. Період осадження помітно коротший, ніж у LDPE, через вищу щільність, коливаючись від $\sim 4\text{--}8$ годин у мряці до $\sim 20\text{--}40$ хвилин у дуже сильному дощі.

В наведеному вище рівнянні (2.1) це додатково враховується через коефіцієнт λ , що описує інтенсивність вимивання частинок з атмосфери вологими процесами. Емпірична залежність коефіцієнта від зовнішніх умов, може мати такий вигляд:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \varepsilon \cdot RH + a \cdot R^b), \quad (2.11)$$

де

λ_0 – базовий коефіцієнт осадження без врахування вологості та дощу;

RH – відносна вологість (0-1 або 0-100%),

ε – емпіричний коефіцієнт впливу вологості, що залежить від гігроскопічності частинок (зазвичай у межах 0.01-0.05),

R – інтенсивність опадів, mm/год;

a, b – емпіричні коефіцієнти впливу дощу ($b = 0.5 - 1$, a – залежить від розмірів частинок).

Таким чином, рівняння адвекції-дифузії-реакції із врахуванням гравітаційного осадження та вимивання частинок дощем є адекватною математичною моделлю для дослідження поширення мікропластику в атмосфері та оцінки його концентрації в просторі й часі.

Для успішного адаптивного налаштування, верифікації та верифікації моделей поширення мікропластику в атмосфері потрібен комплексний набір даних: спостережувані концентрації та швидкості осадження, метеорологічні параметри та детальна інформація про джерела викидів. Кожна категорія даних відіграє унікальну роль у перевірці моделі, але сучасні обмеження в доступності даних (особливо щодо джерел і глобального моніторингу) створюють виклики. Для покращення моделей необхідно розширити експериментальні дослідження, стандартизувати методи збору даних і врахувати регіональні особливості. Тільки за таких умов моделі зможуть достовірно прогнозувати поведінку мікропластику в атмосфері та оцінювати його вплив на довкілля і здоров'я людини.

2.2. Комбінований метод оцінки концентрації мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі інтервального аналізу

Атмосфера є динамічним середовищем, де переміщення повітряних мас (адвекція), турбулентне перемішування (дифузія) та різноманітні фізико-хімічні перетворення (реакції, осадження) визначають долю забруднюючих речовин, включаючи мікропластик. Математичне моделювання цих процесів за допомогою рівнянь АДР є потужним інструментом для прогнозування поширення МП, оцінки ризиків та розробки стратегій їхнього зменшення. В той же час, моделювання поширення мікропластику в атмосфері за допомогою рівнянь адвекції-дифузії-реакції (АДР) потребує даних про концентрацію МП для адаптивного налаштування та верифікації. Ефективність будь-якої моделі АДР критично залежить від якості та репрезентативності вхідних даних. Для адаптивного налаштування параметрів моделі та верифікації (перевірки її здатності точно відтворювати процес поширення) необхідні надійні дані про концентрацію досліджуваної речовини – в нашому випадку, мікропластику – в різних точках простору та часу. Прямий лабораторний аналіз вмісту МП у завислих частинках (ЗР), таких як PM10 та PM2.5, є точним, але дорогим та

часозатратним, що обмежує його застосування для отримання даних з високою просторовою та часовою роздільною здатністю, необхідною для динамічних моделей АДР. Він є складним і включає етапи відбору проб, їхньої підготовки (фільтрація, органічне травлення), ідентифікації та кількісного визначення частинок МП за розміром та матеріалом (часто з використанням мікроскопії та спектроскопічних методів). Кожен такий аналіз вимагає значних витрат на обладнання, реактиви та кваліфікований персонал. Крім того, процес лабораторного аналізу є тривалим. Від моменту відбору проби до отримання результатів може пройти значний час, що ускладнює отримання оперативних даних для адаптивного налаштування динамічних моделей.

Через високу вартість та часові затрати проведення масштабного моніторингу концентрації МП з високою просторовою (багато точок вимірювання) та часовою (часті вимірювання) роздільною здатністю стає практично неможливим. Це створює значну прогалину в даних, необхідних для ефективного моделювання АДР, які потребують інформації про динаміку концентрацій у різних місцях і в різні моменти часу.

На сьогодні існує декілька основних методів для визначення вмісту мікропластику у повітрі, воді та ґрунті. Вони поділяються на польові методи, лабораторний аналіз і інструментальні методи (рис. 2.6). Детальний та критичний аналіз було проведено у першому розділі, що стало підґрунтям для розробки комбінованої методики ідентифікації мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі поєднання портативних та лабораторних приладів.

Використання портативних приладів для визначення загальної концентрації завислих речовин (ЗР) у повітрі є досить ефективним способом. Основна перевага – швидкість та мобільність, що дозволяє проводити вимірювання в реальному часі. Наприклад, лазерні детектори або турбідиметри застосовуються для загальної оцінки концентрації часток у повітрі. Детальний лабораторний аналіз відібраних зразків для визначення складу мікропластику, таких як: ІЧ-спектроскопія (FTIR) дозволяє ідентифікувати хімічний склад часток; Раман-спектроскопія – високоточний метод для ідентифікації

матеріалів; мікроскопічні методи використовуються для визначення форми та розміру часток.



Рис. 2.6. Етапи та методи ідентифікації мікропластику в атмосфері

В той же час, методи лабораторного аналізу забезпечують високу точність результатів, але потребують багато часу, ресурсів і дорогого обладнання. Інструментальні методи базуються на використанні потужних аналізаторів, таких як мас-спектрометри, для визначення мікропластикових часток. Такі прилади мають високу ефективність у лабораторних умовах, проте низьку придатність для масових польових досліджень.

Більшість точних методів, таких як FTIR або Раман-спектроскопія, потребують використання дорогого обладнання та значних ресурсів. Лабораторні аналізи забирають багато часу, оскільки вимагають підготовки зразків, ретельного очищення та багатоступеневої обробки даних. Також інструменти для лабораторного аналізу мають великі розміри, тому їх складно використовувати для польових вимірювань у реальному часі.

У свою чергу портативні прилади зазвичай вимірюють загальну кількість ЗР і не здатні розділити частки на органічні, мінеральні та пластикові. У польових умовах дані часто мають велику похибку через вплив зовнішніх чинників (наприклад, пилу, погодних умов тощо).

Тому актуальною є розробка комбінованих методик, що поєднують польові вимірювання загальної концентрації ЗР із лабораторним аналізом хімічного складу. Використання портативних приладів для вимірювання загальної концентрації завислих речовин у поєднанні з лабораторним аналізом вмісту мікропластику у відібраних зразках дозволяє створити інтервальні оцінки концентрацій мікропластику. Такий комбінований підхід підвищує точність та надійність результатів, знижуючи витрати та час, необхідний для проведення досліджень.

Метою даного підрозділу є розробка методики ідентифікації мікропластику у завислих речовинах на основі інтервального підходу. Запропонована методика поєднує використання портативних вимірювальних приладів та лабораторного аналізу, що дозволяє отримувати інтервальні оцінки концентрацій мікропластику у навколишньому середовищі. Основною метою запропонованої гібридної методики є розробка економічно ефективного підходу для генерації просторово-часових даних про концентрацію мікропластику в атмосферному повітрі, придатних для адаптивного налаштування моделей адвекції-дифузії-реакції, з урахуванням невизначеності, пов'язаної з варіабельністю складу завислих частинок.

Запропонована гібридна методика поєднує швидкі польові вимірювання загальної концентрації ЗР з обмеженим лабораторним аналізом для отримання інтервальних оцінок концентрації МП, що є економічно ефективним рішенням для генерації даних для адаптивного налаштування моделей з урахуванням невизначеності притаманної вимірюванням.

На рисунку 2.7. наведено узагальнену схему реалізації комбінованого методу ідентифікації мікропластику в приземному шарі атмосфери для проведення адаптивного налаштування моделей на основі рівняння адвекції-

дифузії-реакції, яка включає польові вимірювання, лабораторний аналіз та визначення інтервальних оцінок значень концентрації МП.

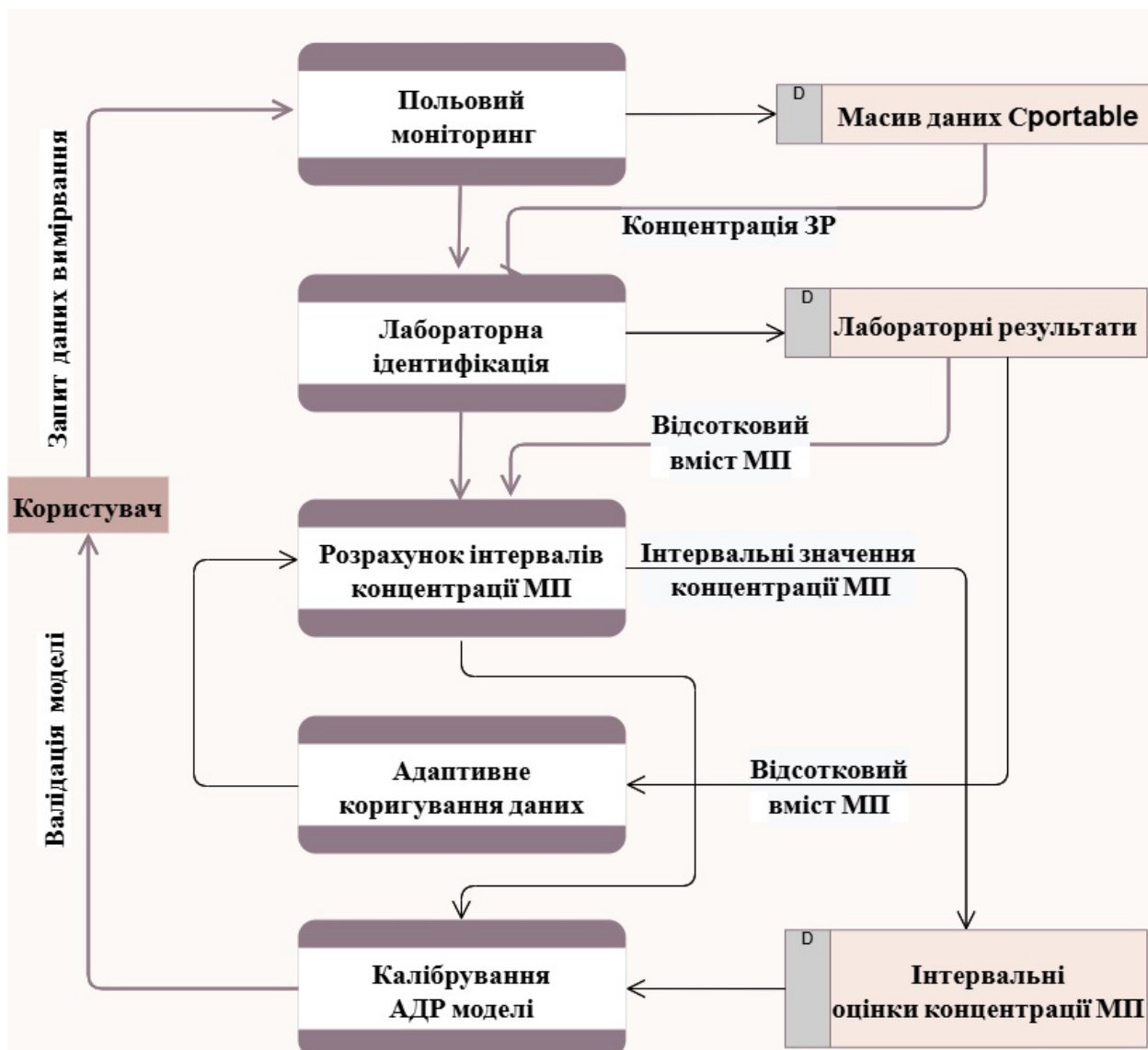


Рис. 2.7. Узагальнена схема реалізації комбінованого методу оцінки концентрації мікропластику в приземному шарі атмосфери

Розглянемо детальніше основні етапи методики комбінованої оцінки концентрації мікропластику в атмосферному повітрі для адаптивного налаштування моделей адвекції-дифузії-реакції.

Етап 1. Польовий моніторинг загальної концентрації завислих частинок.

На цьому етапі використовуються калібровані портативні прилади, здатні вимірювати масову концентрацію завислих частинок певних фракцій, найчастіше PM10 (частинки з аеродинамічним діаметром менше або рівним 10 мікрометрам) та/або PM2.5 (частинки з аеродинамічним діаметром менше або рівним 2.5 мікрометрам). Прикладами таких приладів можуть бути:

- оптичні лічильники частинок (Optical Particle Counters – OPC);
- нефелометри;
- бета-атенюаційні монітори;
- п'єзоелектричні мікробалансні датчики.

За допомогою каліброваних портативних приладів проводяться вимірювання масової концентрації завислих частинок фракцій PM10 та/або PM2.5 (C_{portable}) у просторово-часовій сітці, що відповідає вимогам АДР моделі. Вимірювання проводяться у чітко визначених точках досліджуваної території (просторова сітка) та з певною періодичністю (часова сітка). Щільність та конфігурація цієї сітки визначаються вимогами АДР моделі, враховуючи просторову неоднорідність потенційних джерел МП, складність рельєфу, метеорологічні умови та необхідну деталізацію моделювання. Наприклад, вимірювання можуть проводитися:

- у ключових точках модельної області (наприклад, поблизу промислових зон, транспортних магістралей, житлових районів, сільськогосподарських угідь, фонових станцій);
- на різних висотах (якщо модель є тривимірною);
- з певною часовою роздільною здатністю (наприклад, щогодини, щоденно, щотижнево) для фіксації динаміки змін концентрацій, пов'язаних з метеорологічними явищами, інтенсивністю трафіку, промисловими викидами тощо.

Важливою умовою є використання каліброваних приладів. Налаштування забезпечує точність та співставність результатів вимірювань, отриманих у різних точках та в різний час. Процедури адаптивного

налаштування повинні відповідати рекомендаціям виробника та проводитися регулярно.

Цей етап забезпечує отримання динаміки загального аерозольного навантаження з високою роздільною здатністю, що є важливим для відтворення процесів поширення (адвекції та дифузії та реакції) в моделі. Результатом даного етапу є масиви даних $C_{\text{portable}}(x, y, z, t)$.

Етап 2. Лабораторна ідентифікація вмісту мікропластику.

Паралельно з польовими вимірюваннями, у репрезентативних точках та часових інтервалах проводиться відбір проб ЗР (PM10/PM2.5) для поглибленого лабораторного аналізу. Ключовим є забезпечення репрезентативності цих проб, тобто вони повинні відображати типовий склад ЗР у різних умовах. Стратегія відбору проб має враховувати:

- потенційні джерела МП. Відбір проб поблизу ймовірних джерел забруднення (наприклад, сміттєзвалищ, підприємств з переробки пластику, очисних споруд) та у віддалених фонових районах;
- метеорологічні умови. Відбір проб за різних погодних умов (наприклад, у суху та вологу погоду, при різних напрямках вітру), оскільки метеоумови можуть впливати на склад та концентрацію ЗР;
- врахування сезонних змін у діяльності людини та природних процесах, які можуть впливати на вміст МП (наприклад, опалювальний сезон, сільськогосподарські роботи);
- просторову варіабельність, яка забезпечує відбір проб у різних типах місцевості (міська, сільська, промислова, рекреаційна);
- часові інтервали. Відбір проб у різні години доби, дні тижня для фіксації можливих часових закономірностей.

Відібрані проби піддаються комплексному лабораторному аналізу для визначення відсоткової частки маси мікропластику (Р) у загальній масі ЗР. Застосовуються стандартизовані методи, які можуть включати:

- мікроскопію (оптичну та електронну). Для візуальної ідентифікації та морфологічного аналізу мікропластику після попередньої обробки проби (наприклад, видалення органічної речовини);
- спектроскопічні методи (наприклад, FTIR, Raman). Для хімічної ідентифікації полімерного складу виявлених частинок.
- фракціонування за розміром. Для визначення розподілу МП за розмірними класами;
- гравіметричний аналіз. Для визначення масової частки МП після відокремлення від інших компонентів ЗР.

На основі обмеженої, але репрезентативної вибірки лабораторних аналізів визначається діапазон (інтервал) відсоткового вмісту МП:

$$[P_{lab}] = [P_{min}; P_{max}], \quad (2.12)$$

де P_{min}, P_{max} – це мінімальне та максимальне значення відсоткової частки МП, зафіксоване у лабораторних пробах. Цей інтервал відображає варіабельність частинок мікропластику в складі ЗР та є ключовим елементом квантифікації невизначеності.

Детальне опрацювання цих двох етапів є критично важливим для забезпечення надійності та практичної цінності всієї методики. Наступні етапи будуть використовувати отримані на цих стадіях дані для оцінки концентрації мікропластику та подальшого адаптивного налаштування моделей АДР.

Етап 3. Розрахунок концентрації мікропластику в інтервальному представленні.

Для кожної точки просторово-часової сітки, де було отримано значення $C_{portable}(x, y, z, t)$, розраховується інтервал можливої концентрації МП, $[C(x, y, z, t)]$:

$$[C(x, y, z, t)] = [C(x, y, z, t)^-; C(x, y, z, t)^+], \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} [C(x, y, z, t)^-; C(x, y, z, t)^+] &= C_{portable}(x, y, z, t) \cdot [P_{lab}] = \\ &= [C_{portable}(x, y, z, t) \cdot P_{min}; C_{portable}(x, y, z, t) \cdot P_{max}] \end{aligned} \quad (2.14)$$

Цей результат, $[C(x, y, z, t)]$, є інтервальною оцінкою фактичної концентрації МП у кожній точці вимірювання $C_{portable}(x, y, z, t)$, що враховує невизначеність, пов'язану з варіабельністю вмісту МП у загальній масі ЗР.

Етап 4. Уточнення інтервальних значень відсоткового вмісту МП

З накопиченням даних лабораторних аналізів (наприклад, при довгостроковому моніторингу або розширенні географії), інтервал $[P_{min}; P_{max}]$ може бути уточнений.

Можливе введення контекстно-залежних інтервалів $[P_{min}; P_{max}]$, наприклад, різних для міських та сільських територій, для різних сезонів або метеорологічних умов, якщо лабораторні дані дозволяють виявити такі закономірності. Це підвищить точність інтервальних оцінок концентрації $[C(x, y, z, t)]$.

Етап 5. Використання даних для адаптивного налаштування АДР моделей

Отримані просторово-часові поля інтервальних концентрацій $[C(x, y, z, t)]$ є цільовими даними для адаптивного налаштування параметрів АДР моделі (наприклад, коефіцієнтів дифузії, параметрів джерел викидів, емпіричних констант осадження).

Використання інтервальних, а не точкових значень, дозволяє застосовувати методи адаптивного налаштування, що враховують невизначеність даних (наприклад, методи на основі інтервального аналізу, байєсівські підходи, адаптивного налаштування за допомогою цільових функцій, що працюють з інтервалами). Це призводить до більш надійних та робастних результатів моделювання та оцінки невизначеності модельних прогнозів.

Висока роздільна здатність даних $C_{portable}(x, y, z, t)$ дозволяє налаштовувати модель на відтворення спостережуваної динаміки зміни концентрацій, що важливо для адекватності моделі. Інтервал $[P_{min}; P_{max}]$ накладає обмеження на можливу частку МП у цій динаміці.

Отже, запропонована комбінована методика дозволяє суттєво (на порядок) скоротити витрати на лабораторні дослідження порівняно з суцільним лабораторним моніторингом, роблячи можливим збір даних, необхідних для адаптивного налаштування складних АДР моделей на великих територіях та протягом тривалих періодів часу. Вона забезпечує баланс між вартістю, оперативністю та інформативністю даних, надаючи оцінки концентрації МП разом з кількісною оцінкою їх невизначеності.

Репрезентативність $[P_{min}; P_{max}]$ є ключовим припущенням, що діапазон, отриманий з обмеженої вибірки, адекватно представляє варіабельність вмісту МП у всій досліджуваній області/періоді. Необхідна ретельна розробка стратегії відбору проб. Припускається відносна сталість діапазону $[P_{min}; P_{max}]$ між лабораторними аналізами. У разі значних змін у джерелах викидів може знадобитися частіше оновлення лабораторних даних. Також, базова методика не розрізняє різні типи/розміри МП, якщо лабораторний аналіз не надає такої диференціації. Це може бути обмеженням для моделей АДР, що враховують специфічні властивості частинок.

Запропонована гібридна методика є прагматичним та ефективним підходом для генерації даних про концентрацію мікропластику в повітрі, спеціально адаптованим для потреб адаптивного налаштування моделей поширення АДР. Вона дозволяє отримати просторово-часові поля оцінок концентрації з урахуванням невизначеності, що є критично важливим для розробки надійних екологічних моделей.

Наступним етапом дослідження є розробка методу адаптивного налаштування моделей на основі інтервальних значень $[C(x, y, z, t)]$ у заданих точках просторово-часового поля.

2.3. Метод адаптивного налаштування параметрів моделі АДР на основі методів оптимізації із використанням інтервального аналізу

Розглянемо специфіку та вимоги до методів оптимізації для адаптивного налаштування моделей адвекції-дифузії-реакції (АДР), що важливим кроком для забезпечення адекватності та надійності моделювання поширення забруднюючих речовин, зокрема мікропластику, в атмосфері. Специфіка адаптивного налаштування АДР моделей накладає певні вимоги та визначає особливості застосування різних методів оптимізації.

Розглянемо ключові аспекти, до яких можна віднести складність цільової функції, характеристики параметрів моделі, вимоги до методів оптимізації.

Розглянемо складність цільової функції, як ключовий фактор вибору методу. Її можна охарактеризувати такими:

- нелінійність;
- багатовимірність;
- зашумленість та невизначеність даних;
- обчислювальна вартість.

Зв'язок між параметрами моделі (наприклад, коефіцієнтами дифузії, швидкостями реакцій, параметрами джерел) та вихідними даними (концентраціями) в АДР моделях, як правило, є нелінійним. Це ускладнює пошук глобального оптимуму та може призводити до існування численних локальних мінімумів цільової функції (яка відображає розбіжність між модельними прогнозами та спостереженнями).

Кількість параметрів, що підлягають калібруванню, може бути значною, особливо у складних моделях з урахуванням багатьох джерел, фракцій частинок, реакцій тощо. Це збільшує розмірність простору пошуку та ускладнює оптимізацію.

Експериментальні дані, які використовуються для адаптивного налаштування (в нашому випадку, інтервальні оцінки концентрації МП),

містять певну невизначеність та шум. Це може робити цільову функцію негладкою або навіть розривною, що ускладнює застосування градієнтних методів оптимізації. У нашому випадку, використання інтервальних даних вимагає методів оптимізації, здатних працювати з діапазонами значень.

Оцінка цільової функції часто вимагає багаторазового запуску АДР моделі, яка сама по собі може бути обчислювально-інтенсивною, особливо для моделей з високою просторово-часовою роздільною здатністю та складними фізико-хімічними процесами. Це обмежує можливість використання методів оптимізації, що потребують великої кількості обчислень цільової функції.

До характеристик параметрів моделі, які можуть впливати на вибір методів оптимізації можна віднести:

- фізичні обмеження;
- корельованість параметрів;
- різна чутливість.

Параметри АДР моделей часто мають фізичний зміст і повинні знаходитися в певних діапазонах (наприклад, коефіцієнти дифузії мають бути невід'ємними). Методи оптимізації повинні враховувати ці обмеження.

Параметри моделі можуть бути взаємопов'язані, що означає, що зміна одного параметра може впливати на оптимальні значення інших. Це ускладнює незалежну оптимізацію окремих параметрів.

Моделльні вихідні дані можуть бути по-різному чутливі до змін різних параметрів. Деякі параметри можуть мати незначний вплив на результати, що ускладнює їхню ідентифікацію.

З точки зору вимог до методів оптимізації можна виокремити такі, як:

- глобальна оптимізація;
- робастність;
- ефективність в багатовимірному просторі;
- обчислювальна ефективність;
- здатність враховувати обмеження;
- інтерпретованість результатів.

З огляду на нелінійність цільової функції, бажано використовувати методи глобальної оптимізації, які мають більшу ймовірність знаходження глобального мінімуму, а не застрягання в локальних мінімумах. Прикладами є генетичні алгоритми, алгоритми імітації відпалу, алгоритми рою частинок.

Методи оптимізації повинні бути стійкими до шуму в даних та зданими ефективно працювати з інтервальними цільовими значеннями (як у нашому випадку). Методи, що враховують невизначеність, наприклад, байєсівська оптимізація або методи на основі інтервального аналізу, можуть бути особливо корисними.

Методи оптимізації повинні ефективно досліджувати багатовимірний простір параметрів.

Зважаючи на потенційно високу обчислювальну вартість оцінки цільової функції, методи оптимізації повинні бути якомога ефективнішими за кількістю необхідних ітерацій та обчислень моделі. Можуть бути корисними методи, що використовують сурогатні моделі (метамоделі) для апроксимації складної АДР моделі.

Методи оптимізації повинні мати механізми для врахування фізичних та інших обмежень на параметри моделі.

Бажано, щоб методи оптимізації надавали не лише оптимальні значення параметрів, але й інформацію про чутливість моделі до цих параметрів та про невизначеність отриманих оцінок.

Вибір оптимального методу оптимізації залежить від конкретних характеристик АДР моделі, доступних даних, обчислювальних ресурсів та вимог до точності адаптивного налаштування. Часто ефективним підходом є комбінування різних методів або використання гібридних стратегій. Наприклад, можна використовувати глобальний метод для знаходження перспективної області в просторі параметрів, а потім застосувати локальний метод для більш точного визначення оптимуму. Для нашої гібридної методики з інтервальними даними особливу увагу слід приділяти методам, здатним ефективно працювати з невизначеністю.

На основі критичного аналізу методів оптимізації та характеристик задачі оптимізації для проведення адаптивного налаштування АДР моделей було побудовано таблицю відповідності з оцінками відповідності методів основним вимогам (таблиця 2.3).

Відповідність оцінювалася за такою шкалою:

«+++» – висока відповідність / сильна сторона методу;

«++» – середня відповідність / помітна сторона методу;

«+» – низька відповідність / слабка сторона методу або можливість адаптації;

«-» – низька або відсутня пряма відповідність / значне обмеження.

Як показує таблиця 2.3 генетичні алгоритми (GA) добре підходять для глобальної оптимізації нелінійних та багатовимірних задач. Вони менш чутливі до локальних мінімумів та не потребують обчислення градієнтів. Однак можуть бути обчислювально затратними. Також, алгоритм імітації відпалу (Simulated Annealing – SA), метод глобальної оптимізації, який може ефективно досліджувати складні простори пошуку. Проте, його збіжність може бути повільною. Алгоритм рою частинок (Particle Swarm Optimization – PSO), популяційний метод, який може бути ефективним для пошуку глобального оптимуму в нелінійних задачах. Вимагає налаштування гіперпараметрів.

Байєсівська оптимізація (Bayesian Optimization – BO) особливо корисна для задач з складною цільовою функцією. Вона будує ймовірнісну модель цільової функції (зазвичай на основі гауссових процесів) і використовує її для вибору наступних точок для оцінки. Може бути ефективною для адаптивного налаштування АДР моделей з обмеженою кількістю доступних даних або обчислювальних ресурсів. Добре підходить для врахування апіорних знань про параметри.

Сурогатне моделювання (метамодельювання) – замість безпосереднього використання обчислювально складної АДР моделі, для оптимізації будуватиметься її більш проста апроксимація (наприклад, поліноміальна регресія, нейронна

Таблиця 2.3

Методи оптимізації та аспекти адаптивного налаштування АДР моделей

Ключовий аспект адаптивного налаштування	Генетичні алгоритми (GA)	Алгоритм імітації відпалу (SA)	Алгоритм рою частинок (PSO)	Байссівська оптимізація (BO)	Градєнтні методи на основі інтервального аналізу	Сурогатне моделювання
Складність цільової функції (нелінійність, багатовимірність, зашумленість)	+++ (Добре справляються з нелінійністю та багатовимірністю, менш чутливі до шуму)	++ (Ефективні для складних поверхонь, але можуть бути повільними)	++ (Добре підходять для нелінійних задач, чутливі до параметрів)	++ (Ефективні для складних функцій, але залежать від моделі)	+++ (Спеціально розроблені для роботи з інтервальними даними)	++ (обійти складність прямої оптимізації складної функції)
Характеристики параметрів моделі (обмеження, взаємозалежність, різна чутливість)	++ (Можуть враховувати обмеження, але складніше обробляти взаємозалежність)	++ (Можуть враховувати обмеження)	++ (Можуть враховувати обмеження)	++ (Можуть враховувати апріорні знання та невизначеність параметрів)	+++ (Основна мета – врахування невизначеності параметрів)	++ (Можуть бути включені обмеження в сурогатну модель)
Вимоги до методів оптимізації (глобальність, робастність, врахування обмежень, інтерпретованість)	+++ (Глобальний пошук)	++ (Глобальний пошук, але може бути повільним)	++ (Глобальний пошук)	++ (Глобальний пошук з ефективним використанням попередніх оцінок)	+++ (Враховують невизначеність, надають інтервали рішень)	++ (Ефективність, але залежить від якості сурогатної моделі)
Обчислювальна складність оцінки цільової функції (висока)	- (Можуть мати високу обчислювальну складність)	- (Можуть мати високу обчислювальну складність)	- (Можуть мати високу обчислювальну складність)	++ (Розроблені для складних функцій, мінімізують кількість оцінок)	++ (Ефективність залежить від складності)	+++ (Значно зменшують обчислювальні витрати на оптимізацію)
Робота з інтервальними даними (гібридна методика вимірювань)	+ (Можуть бути адаптовані, але не є їхньою основною метою)	+ (Можуть бути адаптовані)	+ (Можуть бути адаптовані)	++ (Можуть враховувати невизначеність в цільовій функції)	+++ (Спеціально розроблені для роботи з інтервальними даними)	+ (Сурогатні моделі можуть будуватися на інтервальних даних)

мережа, гауссові процеси). Оптимізація проводиться на сурогатній моделі, що значно зменшує обчислювальні витрати. Потім знайдені оптимальні параметри можуть бути перевірені на оригінальній моделі.

Гradientні методи на основі інтервального аналізу спеціально адаптовані для роботи з інтервальними даними. Вони дозволяють знаходити діапазони можливих значень параметрів, які узгоджуються зі спостереженнями в межах заданої невизначеності. Розглянемо постановку задачі оптимізації параметрів АДР рівняння з метою їх адаптивного налаштування на основі обмеженої вибірки даних вимірювань. Для наочності представимо його у дискретній формі на основі методу скінчених різниць.

При дискретизації АДР рівняння методом скінчених різниць неперервна просторово-часова область розбивається на дискретну сітку з вузлами. Значення концентрації (або іншої змінної, що моделюється) розраховуються в цих вузлах у певні моменти часу. Самі диференціальні оператори (частинні похідні за простором і часом) замінюються алгебраїчними виразами, що включають значення змінної в сусідніх вузлах сітки та на попередніх часових кроках.

Нехай, $C_{i,j,k}^n$ позначає модельоване значення концентрації в просторовому вузлі з індексами i, j, k у момент часу t^n :

$$C_{i,j,k}^n \approx C(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y, k \cdot \Delta z, n \cdot \Delta t), \quad (2.15)$$

де $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$ – кроки дискретизації в просторі та часі, i, j, k – дискретні координати точки в тривимірному просторі сітки, а n – дискретний момент часу. Значення $C_{i,j,k}^n$ є чисельним наближенням значення функції $C(x, y, z, t)$ у деякій просторовій точці та відповідний момент часу.

Відповідно,

$$\frac{dC(x, y, z, t)}{dt} \approx \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t}, \quad (2.16)$$

$$\lambda \cdot C(x, y, z, t) \approx \lambda \cdot C_{i,j,k}^n, \quad (2.17)$$

$$S(x, y, z, t) \approx S_{i,j,k}^n, \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} & \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \left(v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,j,k}^n + \left(v_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{i,j,k}^n + \left((v_z - v_x) \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{i,j,k}^n = \\ & = \left(D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)_{i,j,k}^n + \left(D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)_{i,j,k}^n + \left(D_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)_{i,j,k}^n - \lambda \cdot C_{i,j,k}^n + S_{i,j,k}^n. \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} C_{i,j,k}^{n+1} = & C_{i,j,k}^n - \Delta t \cdot \left(\left(v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,j,k}^n + \left(v_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{i,j,k}^n + \left((v_z - v_x) \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{i,j,k}^n \right) + \\ & + \Delta t \cdot \left(\left(D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)_{i,j,k}^n + \left(D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)_{i,j,k}^n + \left(D_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)_{i,j,k}^n \right) - \\ & - \Delta t \cdot \lambda \cdot C_{i,j,k}^n + \Delta t \cdot S_{i,j,k}^n, \end{aligned} \quad (2.21)$$

Апроксимація адвективних членів (другий порядок upwind):

для $v_x > 0$:

$$\left(v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,j,k}^n \approx v_x \cdot \frac{3 \cdot C_{i,j,k}^n - 4 \cdot C_{i-1,j,k}^n + C_{i,j,k}^n}{2 \cdot \Delta x};$$

для $v_x < 0$:

$$\left(v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,j,k}^n \approx v_x \cdot \frac{-3 \cdot C_{i,j,k}^n + 4 \cdot C_{i-1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{2 \cdot \Delta x};$$

для $v_y > 0$:

$$\left(v_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{i,j,k}^n \approx v_y \cdot \frac{3 \cdot C_{i,j,k}^n - 4 \cdot C_{i,j-1,k}^n + C_{i,j-2,k}^n}{2 \cdot \Delta y};$$

для $v_y < 0$:

$$\left(v_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y}\right)_{i,j,k}^n \approx v_y \cdot \frac{-3 \cdot C_{i,j,k}^n + 4 \cdot C_{i,j-1,k}^n - C_{i,j-2,k}^n}{2 \cdot \Delta y};$$

для $v_z > 0$:

$$\left((v_z - v_x) \cdot \frac{\partial C}{\partial y}\right)_{i,j,k}^n \approx v_y \cdot \frac{3 \cdot C_{i,j,k}^n - 4 \cdot C_{i,j,k-1}^n + C_{i,j,k-2}^n}{2 \cdot \Delta y};$$

для $v_z < 0$:

$$\left((v_z - v_x) \cdot \frac{\partial C}{\partial y}\right)_{i,j,k}^n \approx v_y \cdot \frac{-3 \cdot C_{i,j,k}^n + 4 \cdot C_{i,j,k-1}^n + C_{i,j,k-2}^n}{2 \cdot \Delta y};$$

Апроксимація дифузійних членів (центральна різниця другого порядку):

$$\left(D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_{i,j,k}^n \approx D_x \cdot \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{(\Delta x)^2},$$

$$\left(D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right)_{i,j,k}^n \approx D_y \cdot \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{(\Delta y)^2},$$

$$\left(D_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right)_{i,j,k}^n \approx D_z \cdot \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{(\Delta z)^2},$$

Отже, отримуємо функцію у вигляді різницевого оператора F :

$$C_{i,j,k}^n = F(C_{i-2,j-2,k-2}^{n-1}, \dots, C_{i+1,j+1,k+1}^{n-1}, \vec{\theta}), \quad (2.22)$$

де $\vec{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_m)$ – параметри рівняння, якими можуть бути коефіцієнти дифузії (D_x, D_y, D_z), емпіричні коефіцієнти пов'язанні з осадженням: $\lambda_0, \varepsilon, a, b$ та інші фізичні параметри моделі. На дані параметри можуть бути задані обмеження, наприклад, їхні фізично обґрунтовані діапазони.

Нехай, є N точок вимірювань у просторі (який може бути одновимірним, двовимірним або тривимірними). Для кожної точки вимірювання $p_s, s = \overline{1, N}$, визначено інтервальне значення виміряної концентрації мікропластику $\left[(C_{i,j,k}^n)_s^-; (C_{i,j,k}^n)_s^+\right]$, де $(C_{i,j,k}^n)_s^-$ – нижня межа інтервалу, а $(C_{i,j,k}^n)_s^+$ – верхня межа інтервалу виміряної концентрації мікропластику, $s = \overline{1, N}$.

Оптимізаційну задачу для адаптивного налаштування моделі, спираючись на підхід описаний у праці [81] запишемо у такому вигляді:

$$\delta(\vec{\theta}, \vec{\alpha}) \xrightarrow{\vec{\theta}, \vec{\alpha}} \min \quad (2.23)$$

$$\theta_r \in [\theta_r^{\min}, \theta_r^{\max}], r = \overline{1, m}, \quad (2.24)$$

$$\alpha_s \in [0, 1], s = \overline{1, N}. \quad (2.25)$$

Цільова функція, штрафує модельовані значення $(C_{i,j,k}^n)_s$, які виходять за межі інтервальних значень вимірювань $\left[(C_{i,j,k}^n)_s^-; (C_{i,j,k}^n)_s^+\right]$. Мінімізація цільової функції забезпечує утримання всіх модельованих прогнозів в межах відповідних інтервальних значень. Функцію запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta(\vec{\theta}, \vec{\alpha}) &= \sum_{s=1}^N \left((C_{i,j,k}^n)_s - \left(\alpha_i \cdot (C_{i,j,k}^n)_s^- + (1 - \alpha_i) \cdot (C_{i,j,k}^n)_s^+ \right) \right)^2 = \\ &= \sum_{s=1}^N \left(F(C_{i-2,j-2,k-2}^{n-1}, \dots, C_{i+1,j+1,k+1}^{n-1}, \vec{\theta}) \right. \\ &\quad \left. - \left(\alpha_i \cdot (C_{i,j,k}^n)_s^- + (1 - \alpha_i) \cdot (C_{i,j,k}^n)_s^+ \right) \right)^2. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Таким чином, оптимізаційну задачу формулюємо як задачу мінімізації цільової функції, яка оцінює невідповідність між модельованими значеннями концентрації, розрахованими на дискретній сітці, та інтервальними даними, отриманими на основі гібридної методики. Вибір даної форми цільової функції

обумовлений необхідністю обробки інтервальної невизначеності спостережень та цілей, які переслідує налаштування, а саме забезпечення включення прогнозованих на основі моделі значень у інтервали вимірювань.

Отже, ключовими етапами запропонованого методу є:

- початкове моделювання на основі програмного модуля або бібліотеки, яка приймає на вхід параметри рівняння, які є предметом налаштування, та початкові та граничні умови, і повертає прогнозовані значення концентрації в просторі та часі;
- оптимізація параметрів на основі цільової функції () та навчальної вибірки, метою якої є знаходження параметрів АДР рівняння, що забезпечують включення прогнозованих значень концентрації, отриманих на основі моделі, в задані інтервали навчальної вибірки;
- верифікація моделі на основі перевірки на контрольних даних. початкова вибірка розбивається на навчальну вибірку (80%) та використовується для оптимізації параметрів. Контрольна вибірка (20%) – частина даних, яка не використовується в процесі оптимізації.

Узагальнену схему методу наведено на рисунку 2.8.

Приклад. Розглянемо приклад застосування методу адаптивного налаштування для моделювання розповсюдження забруднення мікропластику від точкового джерела (витяжка промислового заводу).

Для спрощення побудуємо модель на основі одновимірного випадку рівняння (2.1) з урахуванням процесів адвекції, дифузії та реакції. При цьому вважатимемо, що коефіцієнт реакції враховує сухе та вологе осадження. Натурні вимірювання концентрацій різних фракцій ЗР (Pm10, Pm2.5, Pm1.0, Pm0.3) проводилися у шести точках та використовуються як основа для визначення інтервальних значень вмісту мікропластику, згідно наведеної в попередньому параграфі методики.

Розглядається одновимірна область довжиною 100 метрів. У цій області розташоване точкове джерело забруднення, що містить викиди з витяжки

заводу. Координату джерела 4 фіксовано на відстані 30 м від початку області (що відповідає індексу сітки 30) (Рис. 2.9).

Результати вимірювань у шести точках, координати яких задано як [5 15 23 30 47 78], наведено у таблиці 2.4. Четверта точка вимірювання (з координатою 30, що відповідає розташуванню джерела) має найвищі значення концентрації, що підтверджує її роль як джерела забруднення.

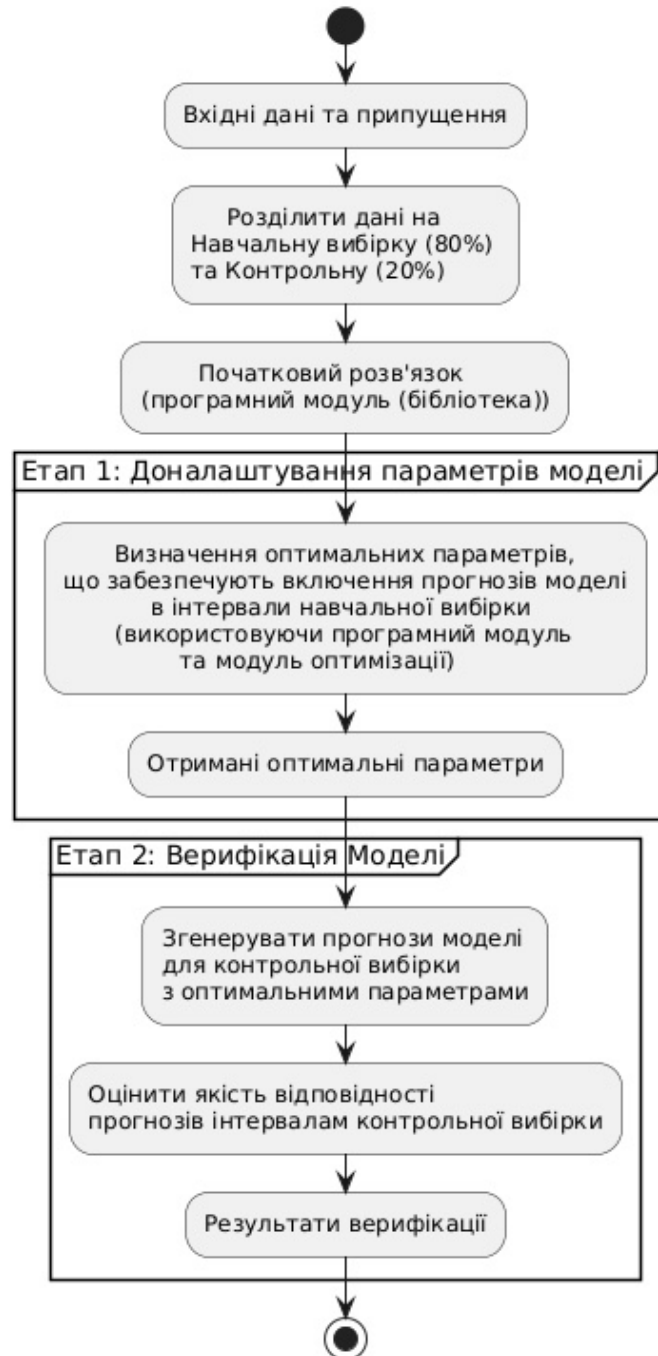


Рис. 2.8. Узагальнена схема методу адаптивного налаштування параметрів моделі

Результати лабораторного аналізу дали можливість встановити інтервальні значення концентрації мікропластику у різних фракціях ЗР біля заводу з сортування та механічної переробки сміття.

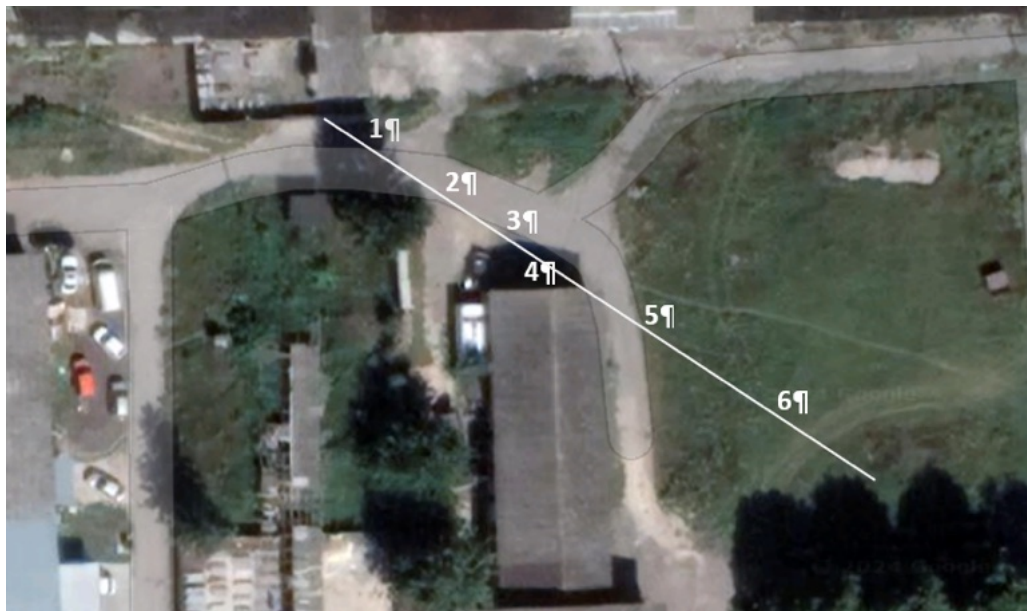


Рис. 2.9. Область вимірювань в районі заводу вздовж осі x з наведеними точками вимірювань

Таблиця 2.4.

Результати польових вимірювань

Номер точки	Координата, x	PM0.3 (PC/L)	PM1.0 (PC/L)	PM2.5 (PC/L)	PM10 (PC/L)
1	5	6670	142	15	0
2	15	7552	144	26	0
3	23	210870	14543	1410	100
4	30	387941	32755	3676	297
5	47	7509	258	38	37
6	78	6535	202	0	0

Зокрема, для PM10 (Частинки < 10 мкм) встановлено такий розподіл частинок: мінеральний пил (грунт, пісок, цемент) – 20% – 50%. Можливе джерело: походження рух транспорту по території, розвантаження/завантаження, вітрова ерозія з відкритих ділянок; органічні частинки (не пластик) – 15% – 40%. Можливе джерело: фрагменти деревини, паперу, харчових відходів, рослинні залишки, грунт, пилок (сезонно), біоаерозолі (спори грибів, бактерії, особливо якщо є компостування); Мікропластик – 5%-20%. Джерело: подрібнення пластикових відходів, стирання шин транспорту, фрагментація плівки та інших пластикових виробів; сажа (від вихлопів транспорту): 5% – 10%.

Для PM2.5 (Частинки < 2.5 мкм): сажа та продукти згоряння – 15% – 35%. Джерела: вихлопні гази дизельних вантажівок, робота іншого обладнання; вторинні аерозолі (сульфати, нітрати, амоній) – 15% – 35%. Утворюються в атмосфері з газів (SO_2 , NO_x , NH_3), що виділяються транспортом та при розкладанні органіки. Їхня частка сильно залежить від погоди та фонового забруднення; дрібний мінеральний пил – 10% – 25%; дрібні органічні частинки та біоаерозолі – 10% – 25%. Включає бактерії, фрагменти грибків, дрібні органічні фрагменти; мікропластик – 5% – 15%, дрібніші фрагменти пластику, що утворюються при подрібненні або стиранні; метали (слідові кількості) – 1% – 5%. З вихлопів, стирання деталей, пилу.

PM1.0 та PM0.3 (Дуже дрібні та ультрадрібні частинки): У цих найдрібніших фракціях зазвичай домінують частинки від процесів згоряння (сажа) та вторинні аерозолі (сульфати, нітрати). Частка мікропластику тут, значно менша порівняно з PM10 та PM2.5, 0,5-1%, наявність ультрадрібних пластикових частинок спричинена процесами подрібнення.

Основною метою експерименту було адаптивного налаштування моделі на основі визначення оптимальних значень коефіцієнтів рівняння. Налаштування здійснюється на основі результатів моделювання за натурними вимірюваннями у шести точках. Для формального адаптивного налаштування було обрано такі параметри моделі, як коефіцієнт адвекції v_x , коефіцієнт

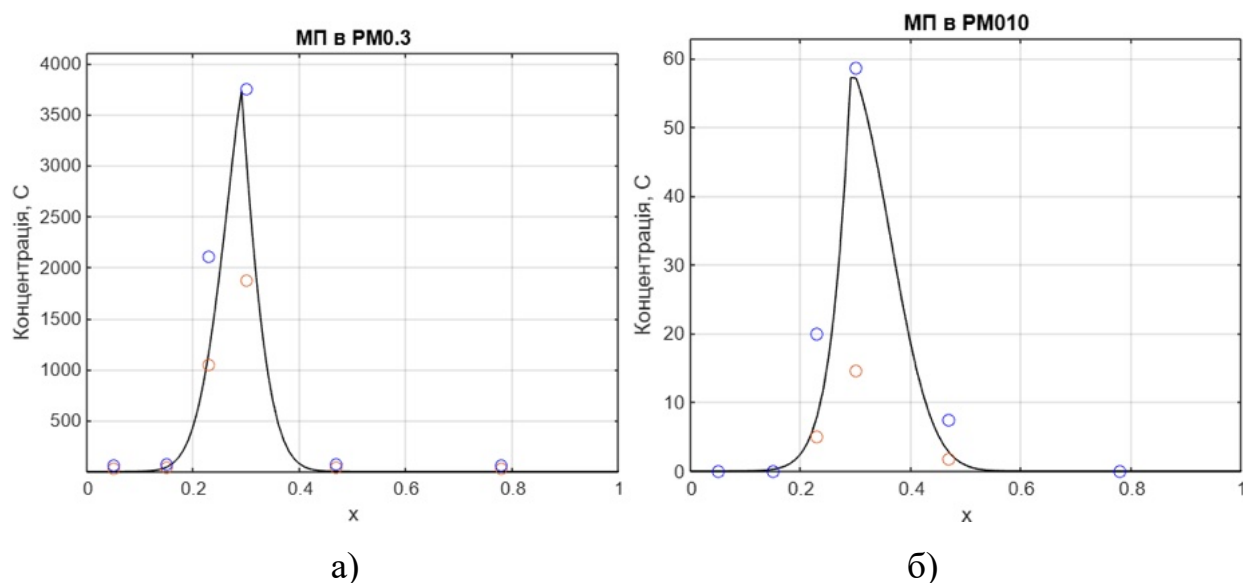
дифузії D_x та коефіцієнт реакції – осадження мікропластику в повітрі, λ , та застосовувався оптимізаційний алгоритм, який мінімізує квадрат відхилення між модельованими значеннями та експериментальними даними, у вигляді деякої точки в межах інтервалів. Результати оптимізації наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5.

Результати адаптивного налаштування моделей

Тип вимірювання	Межі вмісту мікропластику, %	Параметри рівняння		
		Коефіцієнт адвекції, v_x	Коефіцієнт дифузії, D_x	Коефіцієнт реакції, λ
PM10	5-20	5.5	21	0.001
PM2.5	5-15	0.9	12	0.00087
PM1.0	0.5-1	-2.8	83	0.00067
PM0.3	0.5-1	-1.29	13	0.0001

За результатами моделювання та адаптивного налаштування побудовано графіки розподілу концентрації МП вздовж одновимірної області (рис. 2.10). На кінцевих графіках (після завершення циклу моделювання) накладені значення інтервальних меж у точках вимірювань з відповідними координатами, які нормовані.



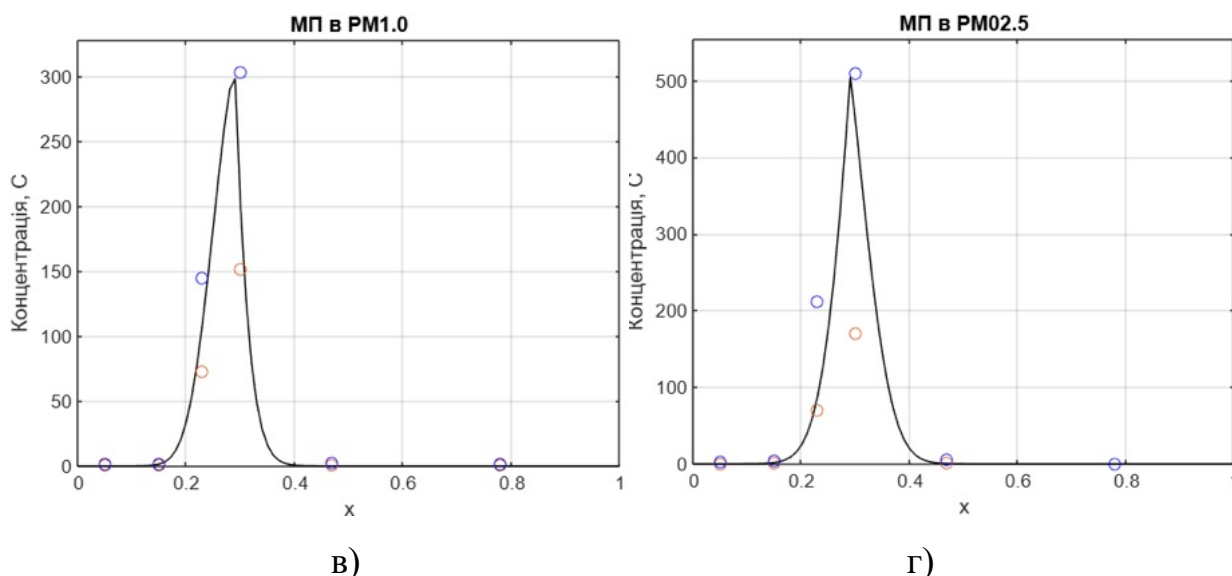


Рис. 2.10. Результати адаптивного налаштування моделей поширення мікропластику різної фракції на основі методу оптимізації із використанням інтервального аналізу: а) на основі вимірювання PM0.3; б) на основі вимірювання PM10; в) на основі вимірювання PM1.0; г) на основі вимірювання PM2.5

Спостереження відображаються у вигляді точок, що відповідають нижній та верхній межах вимірних інтервалів, що демонструє як модельовані прогнози узгоджуються з експериментальними даними.

Отже, наведений експеримент продемонстрував ефективність комбінованого підходу ідентифікації концентрації мікропластику на основі поєднання польових замірів завислих речовин різної фракції та вибіркового лабораторний аналіз для встановлення інтервальних меж вмісту мікропластику.

На основі запропонованого підходу адаптивного налаштування моделей поширення із використанням гібридних методів, що поєднують градієнтні методи оптимізації та методи інтервального аналізу, продемонстровано ефективність моделювання розповсюдження мікропластику від точкового джерела на прикладі сміттєперероблювального заводу в одновимірному просторі з урахуванням процесів адвекції, дифузії та реакції.

Натурні вимірювання концентрацій у кількох точках використовуються як основа для адаптивного налаштування та візуального порівняння з результатами моделювання. Для формального адаптивного налаштування параметрів моделі (коефіцієнти адвекції, дифузії та реакції (осадження)) застосовано оптимізаційний алгоритм, який мінімізує розбіжності між модельованими прогнозами та експериментальними даними вимірювань.

2.4. Алгоритмічне забезпечення реалізації методів моніторингу та моделювання поширення мікропластику

Ефективне застосування розроблених у попередніх підрозділах методів моніторингу та моделювання перенесення мікропластику в приземному шарі атмосфери вимагає створення відповідного алгоритмічного забезпечення. Цей підрозділ присвячено опису загальної структури розробленого програмного комплексу, призначеного для автоматизації ключових етапів дослідження.

Загальна структура алгоритмічного забезпечення побудована за модульним принципом, що забезпечує гнучкість, масштабованість та зручність у використанні (рис. 2.11).

Алгоритмічне забезпечення включає такі основні функціональні модулі:

- модуль обробки експериментальних даних;
- модуль отримання даних про метеоумови та рельєф;
- модуль чисельного моделювання поширення мікропластику ;
- модуль адаптивного налаштування моделей;
- модуль візуалізації результатів.

Модуль обробки експериментальних даних відповідає за імпорт, первинну обробку та підготовку даних, отриманих в результаті застосування комбінованого методу ідентифікації мікропластику (описаного у параграфі 2.2). Він забезпечує зчитування даних про концентрацію МП у точках спостереження (рис 2.12), їхню фільтрацію, статистичну обробку (наприклад, розрахунок середніх значень та меж інтервалів) та форматування для

подальшого використання в процесі адаптивного налаштування моделі (рис. 2.13).

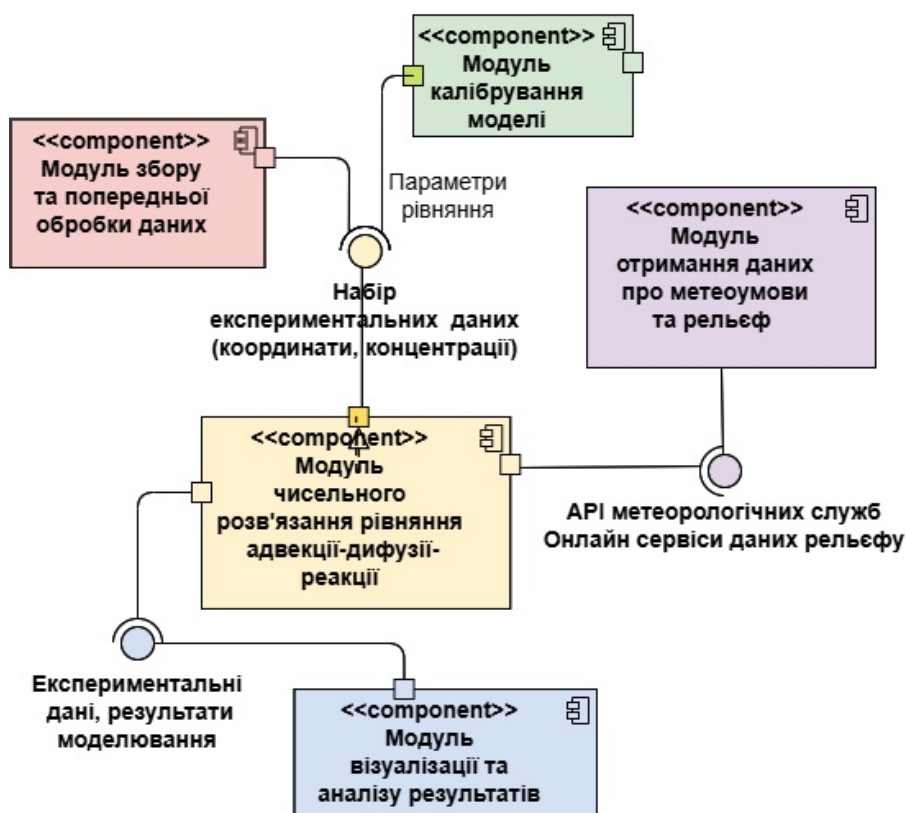


Рис. 2.11. Структура алгоритмічного забезпечення

Модуль отримання даних про метеоумови та рельєф виконує критично важливу функцію в системі моделювання, забезпечуючи отримання, обробку та підготовку даних про метеорологічні умови та рельєф місцевості, які є необхідними вхідними даними для модуля чисельного розв'язання рівняння адвекції-дифузії-реакції, що моделює перенесення мікропластику.

Основні завдання модуля є отримання даних з різних джерел: онлайн API метеорологічних служб, що надають доступ до поточних та історичних метеорологічних даних; онлайн сервіси даних рельєфу, що надають цифрові моделі місцевості (DEM).

Отримані дані можуть бути в різних форматах та мати різну якість. Модуль виконує необхідні операції з обробки та очищення. Метеорологічні дані та дані рельєфу повинні бути прив'язані до єдиної географічної системи

координат та узгоджені з просторовою роздільною здатністю сітки моделювання.



Рис. 2.12. Алгоритм обробки експериментальних даних (агрегація та групування)



Рис. 2.13. Алгоритм обробки експериментальних даних (приведення до інтервального вигляду)

Також модуль готує кінцевий набір даних у форматі, який оптимально підходить для використання в модулі моделювання перенесення мікропластику. Це може включати створення багатовимірних масивів, що містять значення метеорологічних параметрів та висоти рельєфу для кожної комірки розрахункової сітки.

Цей модуль є критично важливим компонентом системи, оскільки він забезпечує надходження точних і релевантних вхідних даних, без яких

неможливе коректне та змістовне моделювання перенесення мікропластику. Якість вихідних даних, підготовлених цим модулем, безпосередньо впливає на достовірність та надійність результатів моделювання.

Модуль чисельного моделювання поширення мікропластику є центральним модулем, який реалізує чисельне розв'язання рівняння адвекції-дифузії-реакції (детально описаного у параграфі 2.1). Він включає алгоритми дискретизації простору та часу (рис. 2.14).

Даний модуль також включає процедури обчислення концентрації МП у заданій області на кожному часовому кроці з урахуванням заданих параметрів моделі (швидкості адвекції, коефіцієнта дифузії, коефіцієнта реакції), початкових та граничних умов. Крім того він інтегрує основні рішення для розв'язування рівняння АДР (рис. 2.15).

Модуль адаптивного налаштування моделей реалізує метод оптимізації коефіцієнтів рівняння адвекції-дифузії-реакції, який описано у параграфі 2.3 (рис. 2.16).

Він використовує експериментальні дані, підготовлені модулем обробки, та результати чисельного моделювання для пошуку оптимальних значень параметрів моделі, які забезпечують найкраще узгодження теоретичних прогнозів з натурними вимірюваннями. Модуль включає реалізацію обраного алгоритму оптимізації та критеріїв зупинки.

Модуль візуалізації результатів забезпечує графічне представлення як експериментальних даних, так і результатів моделювання та адаптивного налаштування. Він дозволяє візуалізувати просторово-часовий розподіл концентрації МП, порівнювати модельні прогнози зі спостереженнями, відображати процес оптимізації та оцінювати якість адаптивного налаштування.

Взаємодія між цими модулями організована таким чином, що забезпечує послідовний «workflow» дослідження: від обробки первинних експериментальних даних до отримання верифікованої моделі поширення мікропластику.

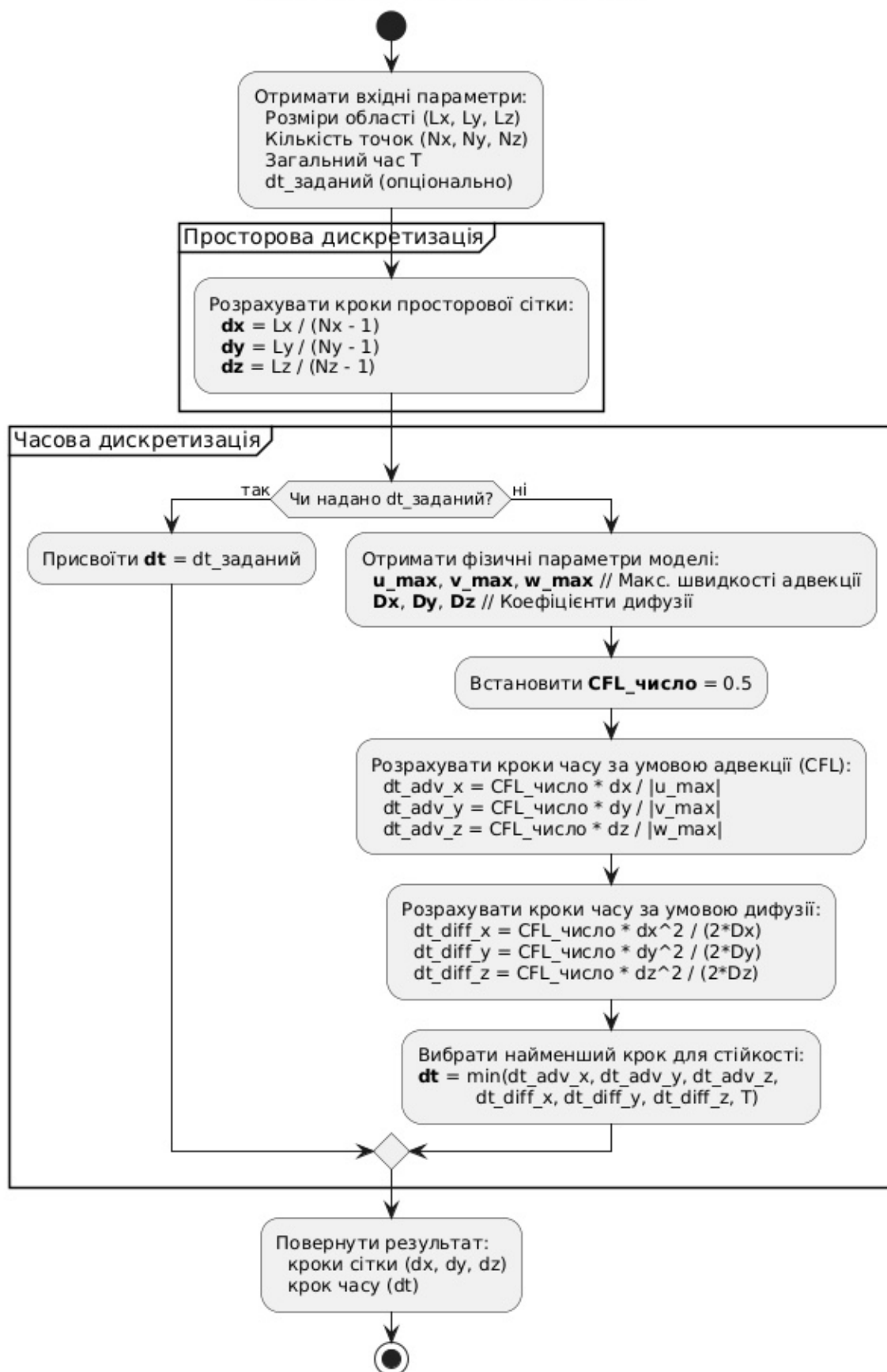


Рис. 2.14. Алгоритм дискретизація простору та часу



Рис. 2.15. Алгоритм чисельного розв'язку рівняння

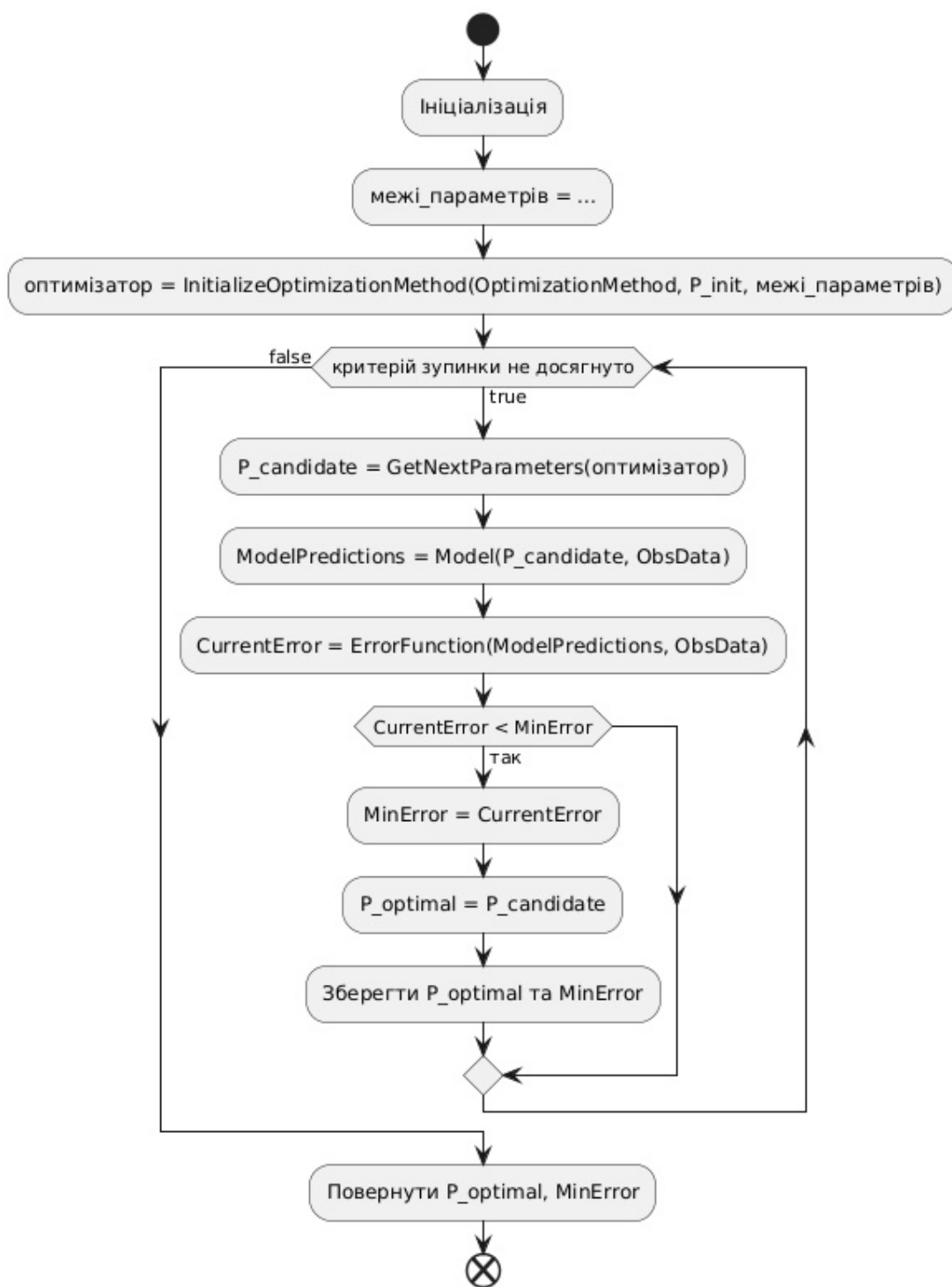


Рис. 2.16. Алгоритм адаптивного налаштування моделі

Детальний опис реалізації алгоритмів, що лежать в основі кожного модуля, а також архітектура програмної реалізації буде представлено у четвертому розділі.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено та детально описано метод математичного моделювання, який базується на рівнянні адвекції-дифузії-реакції. Цей підхід ефективно враховує ключові фізичні процеси, що впливають на поширення мікропластику, включно з його перенесенням повітряними потоками, турбулентним розсіюванням та механізмами видалення з атмосфери.

2. Представлено комбінований метод оцінки концентрації мікропластику у приземному шарі атмосфери. Він інтегрує етапи пробовідбору повітря та подальшого фізико-хімічного аналізу зібраних частинок. Розроблена методика охоплює вибір оптимальних методів пробовідбору, підготовку зразків та застосування сучасних інструментальних технік для визначення полімерного складу та характеристик мікропластику. Метод забезпечує отримання інтервальних оцінок концентрації мікропластику в точках вимірювань на основі комбінування польових вимірювань концентрації завислих речовин та лабораторних вимірювань концентрації мікропластику, що уможливило зменшення кількості лабораторних досліджень.

3. Розроблено та обґрунтовано метод адаптивного налаштування параметрів моделі на основі рівняння АДР. Цей метод є ключовим для підвищення точності моделювання, оскільки він дозволяє оптимізувати параметри рівняння (коефіцієнти адвекції, дифузії та реакції) шляхом мінімізації розбіжностей між модельованими прогнозами та фактичними експериментальними даними, отриманими за допомогою комбінованого методу оцінки концентрації мікропластику. Описано вибір критеріїв та застосування відповідних чисельних методів оптимізації. Особливістю методу є те, що він уможливорює побудову моделей поширення мікропластику з гарантованою точністю та прогностичними властивостями. Точність моделей визначається інтервальними оцінками, що використовуються для налаштування та верифікації цих моделей.

4. Представлено спроектоване алгоритмічне забезпечення, що реалізує запропоновані методи. Детально описано структуру, взаємодію та функціональні можливості розроблених програмних модулів, які забезпечують автоматизацію обробки експериментальних даних, чисельне розв'язання АДР рівняння та процедуру адаптивного налаштування моделі.

Таким чином, в даному розділі закладено основи розробки практичних інструментів для комплексного експериментального дослідження та математичного моделювання процесів поширення мікропластику. Розроблені методи забезпечують можливість ефективного моделювання, верифікації та прогнозування поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери, закладаючи основу для подальших досліджень.

РОЗДІЛ 3.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ НА ОСНОВІ ДЖЕРЕЛ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено розробці математичних моделей, що описують процеси поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери в умовах обмеженої вибірки даних вимірювань з урахуванням різних типів джерел антропогенного забруднення.

В параграфі 3.1 розглядаються методи формування вихідних даних для моделювання поширення мікропластику із застосуванням сучасних технологій геоінформаційних систем (ГІС). Описуються способи збору, обробки та просторової прив'язки даних про джерела забруднення, характеристики навколишнього середовища (рельєф, метеорологічні умови) та інші фактори, що впливають на поширення мікропластику. Особлива увага приділяється методам інтеграції модельних даних у ГІС для картографічного відображення та просторового аналізу результатів моделювання.

В розділі розроблено модель поширення мікропластику від точкових джерел, таких як сміттєперероблювальні заводи. Модель враховує викиди мікропластику з окремих джерел та їх поширення на прилеглі території. У параграфі 3.3 розроблено модель поширення мікропластику для оцінки впливу на довкілля сміттєзвалищ. Ця модель враховує специфічні процеси, пов'язані з поширенням мікропластику з масивних джерел забруднення (сміттєзвалищ), таких як фільтрація та вивітрювання. У параграфі 3.4 розглядається модель поширення мікропластику у придорожніх екосистемах, де основним джерелом є знос автомобільних шин. Модель враховує особливості утворення та поширення мікропластику в умовах дорожнього руху та прилеглих територій.

Розроблені математичні моделі базуються на рівняннях адвекції-дифузії-реакції та враховують ключові фізичні процеси, що визначають поширення мікропластику у відповідних середовищах. Вони дозволяють прогнозувати просторово-часовий розподіл концентрації мікропластику

залежно від характеристик джерела, метеорологічних умов, властивостей навколишнього середовища та фізичних властивостей самих частинок мікропластику. Передбачається інтеграція розроблених моделей в розробленому програмному забезпеченні та функціоналом геоінформаційних систем для візуалізації та картографічного аналізу поширення мікропластику.

Основні результати цього розділу опубліковані в працях [159, 160].

3.1. Формування вхідних даних для моделювання із використанням ГІС

Моделювання поширення мікропластику в атмосфері за допомогою рівняння адвекції-дифузії-реакції вимагає точних та просторово-розподілених вхідних даних, що характеризують джерела викидів, метеорологічні умови та особливості підстильної поверхні. Геоінформаційні системи є потужним інструментом для збору, інтеграції, аналізу та візуалізації таких даних. Для управління цими геопросторовими даними, їх інтеграції з математичними моделями та потенційного використання результатів у даному дослідженні було обрано відкриту геоінформаційну платформу GeoNode. Вона дозволяє централізовано зберігати, каталогізувати та візуалізувати різноманітні геопросторові набори даних, необхідні для моделювання.

Формування вхідного шару даних значною мірою спирається на використання відкритих даних та сервісів, доступних через Інтернет.

3.1.1. Ключові категорії даних, їх джерела та роль ГІС у їх формуванні.

Створення логічної схеми класифікації ГІС-даних є ключовим для ефективного управління проектом, особливо при роботі з різними типами даних у платформі як GeoNode. На рис. 3.1 наведено схему ієрархії вхідних даних моделювання поширення мікропластику, які формуються на основі ГІС.

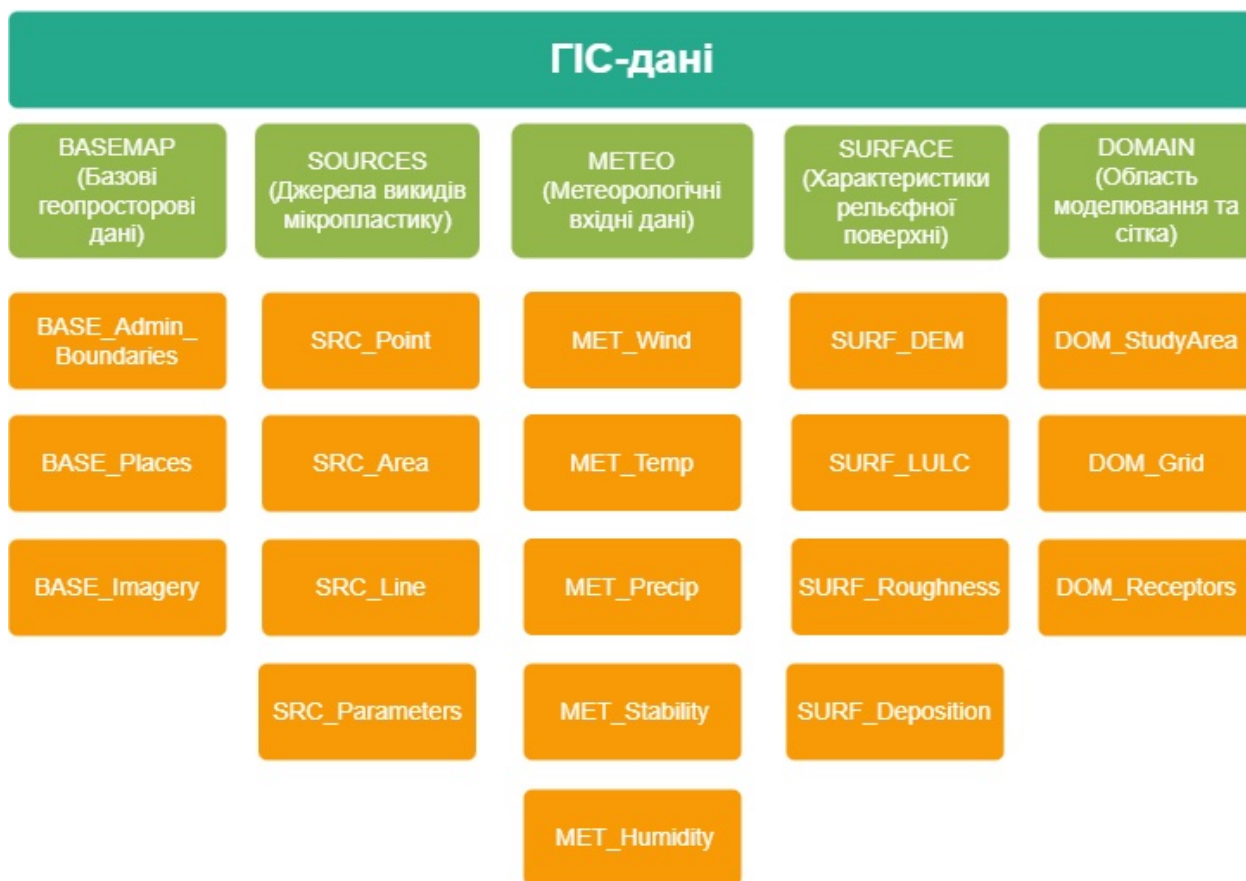


Рис. 3.1. Класифікація вхідних даних моделювання отриманих на основі ГІС

Основні категорії першого рівня групують дані за їх функціональним призначенням у процесі моделювання:

- базові геопросторові дані забезпечують географічний контекст та орієнтацію;
- дані, що характеризують джерела викидів мікропластику, такі як розташування, геометрію та інтенсивність джерел;
- метеорологічні вхідні дані, що визначають атмосферний перенос та дифузію;
- дані характеристик рельєфної поверхні, що впливають на приземні потоки, турбулентність та процеси осадження;
- область моделювання та сітка визначають просторові межі та структуру розрахунків.

Коротко проаналізуємо процеси обробки даних на основі ГІС.

Характеристики джерел викидів.

У параграфах 3.2-3.4 розглядаються різні типи джерел викидів забруднюючих речовин в атмосферу, що мають характерні геометричні особливості та, відповідно, потребують різних підходів до моделювання їх впливу на довкілля.

Точкове джерело (на прикладі заводу) характеризується локалізованим місцем викиду з певними параметрами, такими як висота труби, діаметр отвору, швидкість та температура газів, а також інтенсивність викиду забруднюючих речовин. Такі джерела є компактними і їх вплив розповсюджується відносно концентрично.

Площинне джерело (на прикладі сміттєзвалища) представляє собою значну за площею територію, з якої відбувається дифузне виділення забруднюючих речовин. Інтенсивність викидів зазвичай характеризується величиною потоку забруднюючих речовин з одиниці площі. Моделювання таких джерел враховує розподіл інтенсивності викидів по площі.

Лінійне джерело (на прикладі дороги) характеризується протяжним об'єктом, вздовж якого відбуваються викиди (наприклад, стирання шин). Інтенсивність викидів зазвичай задається як кількість викинутих речовин на одиницю довжини дороги. Моделювання таких джерел враховує напрямок та інтенсивність руху транспорту.

Розуміння геометричних характеристик та параметрів кожного типу джерела є ключовим для адекватного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин у атмосфері та оцінки їх впливу на якість повітря.

Для визначення місцезнаходження та геометрії джерел використовуються дані OpenStreetMap (OSM) (дорожня мережа, потенційні промислові зони, ідентифікація можливих полігонів ТПВ), дані супутникових знімків (наприклад, Sentinel з Copernicus Data Space Ecosystem), та, за наявності, відкриті дані національних або регіональних кадастрових систем чи реєстрів.

Дані про інтенсивність руху (для доріг) можуть бути отримані з відкритих звітів транспортних служб або оцінені на основі класифікації доріг в OSM. Дані про потужності заводів чи характеристики сміттєзвалищ часто є специфічними і можуть вимагати збору з відкритих звітів підприємств, екологічних паспортів (якщо доступні) або експертних оцінок.

Використання ГІС для формування вхідних даних стосовно джерел для моделювання включає:

- геореферування та оцифрування джерел в ГІС (наприклад, QGIS, ArcGIS);
- створення векторних шарів (точки, лінії, полігони);
- прив'язка атрибутивних даних, завантаження цих шарів у GeoNode для зберігання, візуалізації та спільного доступу.

Метеорологічні дані.

Рівняння адвекції-дифузії вимагає даних про поле вітру (v_x, v_y, v_z), коефіцієнти турбулентної дифузії (D_x, D_y, D_z), температуру, опади тощо.

Можливими джерелами даних є:

- Історичні дані/Реаналіз. Глобальні набори даних реаналізу, такі як ERA5 від Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), доступні через Copernicus Climate Data Store (CDS). Вони надають погодинні дані з просторовим розрізненням ~30 км.
- Прогнозні дані. Дані глобальних моделей прогнозу погоди, наприклад, GFS від NOAA, можуть бути використані для прогнозного моделювання.
- Супутникові дані. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) надає дані про склад атмосфери та метеорологічні параметри.
- Наземні станції. Дані з локальних метеостанцій (якщо доступні у відкритому форматі або через API) можуть бути використані для верифікації або даунскейлінгу модельних даних.

Використання ГІС для формування вхідних даних для моделювання включає імпорт метеорологічних даних (часто у форматах NetCDF або GRIB) в ГІС, їх обробка (просторова інтерполяція на розрахункову сітку, вибір часових зрізів, розрахунок похідних параметрів, наприклад, класів стабільності), конвертація у формати, сумісні з моделлю та GeoNode (наприклад, GeoTIFF для растрових полів). Завантаження оброблених метеорологічних шарів у GeoNode.

Характеристики рельєфної поверхні.

Топографія, типи землекористування та покриття впливають на модельні параметри.

Можливими джерелами даних є:

- цифрова модель рельєфу (ЦМР). Відкриті глобальні ЦМР, такі як SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) або Copernicus DEM, доступні для завантаження з порталів на кшталт USGS EarthExplorer або Copernicus Data Space Ecosystem.
- карти землекористування/земного покриття (LULC). Глобальні та регіональні продукти Copernicus Global Land Service (наприклад, карти Land Cover з розрізненням 100м або вище), дані OSM (деталізація типів покриття).

Використання ГІС для формування вхідних даних для моделювання включає:

- обробку ЦМР для отримання висот та ухилів;
- рекласифікація карт LULC для присвоєння параметрів шорсткості поверхні (R_s), який використовується для сухого осадження (v_s) для кожного класу покриття;
- створення регулярної розрахункової сітки та присвоєння кожній її комірці відповідних параметрів поверхні;
- завантаження шарів рельєфу та характеристик поверхні (шорсткість, тип покриття) в GeoNode.

3.1.2. Формат вихідних даних для моделі та їх інтеграція

Використання ГІС-інструментів дозволяє трансформувати дані з відкритих джерел у формати, придатні для математичної моделі (текстові файли параметрів, растрові сітки ASCII Grid, GeoTIFF, NetCDF). Платформа GeoNode слугує центральним репозиторієм для цих підготовлених даних, забезпечуючи їх доступність, версіювання та візуалізацію поряд з результатами моделювання. Це спрощує процес інтеграції даних у модельні розрахунки та аналіз отриманих результатів поширення мікропластику для різних сценаріїв.

Розглянемо, як саме ГІС-інструменти (наприклад поширених систем як QGIS або ArcGIS, а також бібліотек типу GDAL/OGR) допомагають трансформувати дані з відкритих джерел у формати, придатні для вашої моделі адвекції-дифузії-реакції, інтегрованої з GeoNode. ГІС виступає як потужний «конвертер» та «підготовча ланка» для геопросторових даних.

Зокрема, перетворення форматів файлів з метеоданими. Дані реаналізу ERA5 часто завантажуються у форматі NetCDF (.nc) або GRIB (.grib). Ці формати містять багатовимірні масиви даних (наприклад, вітер U/V, температура на різних рівнях тиску та для різних часових кроків). Модель може вимагати простіші 2D-3D-растрові файли для кожного параметра на певний час, наприклад, у форматі GeoTIFF (.tif) або ASCII Grid (.asc).

Використання інструментів QGIS (наприклад, вбудовані інструменти GDAL або плагіни для роботи з NetCDF/GRIB) або скрипти Python з бібліотекою xarray та rasterio забезпечує:

- вибір конкретного часовий зрізу та рівня тиску/висоти;
- виділення потрібної змінної (наприклад, U-компоненту вітру);
- конвертування зрізу у формат GeoTIFF або ASCII Grid, який модель зможе прочитати. Ці файли потім можна завантажити в GeoNode.

Також, можливе здійснення трансформації систем координат (Перепроєктування). Дані OpenStreetMap (дороги, будівлі) зазвичай мають географічну систему координат WGS 84 (EPSG:4326), де одиницями є градуси.

Розроблювана модель, особливо якщо вона працює на локальному/регіональному рівні (як Тернопільська область), потребує проектованої системи координат (наприклад, UTM Zone 35N – EPSG:32635), де одиницями є метри. Це важливо для коректного розрахунку відстаней, площ та швидкостей.

У будь-якій ГІС (QGIS, ArcGIS) є функція «Перепроєктувати шар» (Reproject Layer). Де можна вказати вхідний шар (наприклад, дороги з OSM в EPSG:4326) та цільову систему координат (наприклад, EPSG:32635). ГІС перераховує координати всіх вершин об'єктів. Це потрібно зробити для всіх вхідних шарів (джерела, ЦМР, LULC), щоб вони були в одній системі координат.

Растрезація (Вектор -> Растр). Прикладом є джерело – сміттєзвалище, для полігонального векторного шару, що представляє межі сміттєзвалища. Модель працює на регулярній сітці (растрі) і потребує знання, які комірки сітки відповідають джерелу емісії.

Інструмент «Растрезувати» (Rasterize / Vector to Raster) в ГІС дозволяє створити новий растровий шар з такою ж роздільною здатністю та екстентом, як модельна сітка. Необхідно вказати полігон сміттєзвалища як вхідний вектор, і задати значення (наприклад, 1 або оцінену інтенсивність емісії), яке буде присвоєно всім пікселям растру, що потрапляють всередину полігону. Пікселі поза полігоном отримають інше значення (наприклад, 0 або NoData).

Просторова інтерполяція (Точки -> Растр). Прикладом є обробка метеоданих зі станцій. Якщо використовують дані з наземних метеостанцій (точки), модель потребує неперервних полів (наприклад, температури чи швидкості вітру) по всій області моделювання. Інструменти просторової інтерполяції (наприклад, IDW – Inverse Distance Weighting, Kriging) в ГІС дозволяють створити растровий шар (поверхню) на основі значень у точках спостережень. Результатом буде карта прогнозованих значень між станціями.

Зміна роздільної здатності (Resampling). Якщо використовується Copernicus DEM з роздільною здатністю 30 метрів, але модельна сітка має крок

100 метрів. Інструмент «Змінити роздільну здатність» або функції агрегації/ресемплінгу (Warp/Resample в GDAL) дозволяють перерахувати значення растру для нової сітки. Можна використовувати різні методи: усереднення (average), білінійну інтерполяцію, метод найближчого сусіда (важливо для категорійних даних як LULC).

Обрізка (Clipping). Глобальні набори даних (ERA5, Copernicus Global Land Cover) охоплюють всю земну кулю або великі регіони. Якщо потрібні дані лише для деякої обмеженої області інтересу (наприклад, Тернопільська область + буфер), створюється полігональний шар, що визначає межі області моделювання. Потім інструментом «Обрізати растр за маскою» (Clip Raster by Mask Layer) або «Обрізати вектор за полігоном» (Clip) «вирізають» потрібний шматок даних з глобального набору.

Рекласифікація (Зміна значень растру). Шар Copernicus Land Cover (LULC) містить класи (наприклад, 10 – ліс, 20 – поле, 50 – міська забудова). Модель потребує значення параметру поверхневого опору осадженню (R_s). Інструмент «Рекласифікувати» (Reclassify) дозволяє створити новий растровий шар, де кожному класу LULC присвоюється відповідне значення R_s згідно з довідковими таблицями (наприклад, лісу присвоюється $R_s = 1.0$ м, полю $R_s = 0.05$ м, місту, $R_s = 0.8$ м).

Вибірка значень растру (Raster sampling). Підготовка фінального даних – після всіх перетворень формуються растрові шари для всіх необхідних параметрів (висота рельєфу, шорсткість R_s , v_x, v_y, v_z , інтенсивність емісії з площинних/лінійних джерел) в потрібній системі координат та з потрібною роздільною здатністю. Модель отримує на вході текстовий файл, де для кожної комірки сітки (ідентифікованої індексами i, j, k) вказані всі ці параметри. Інструменти “Raster values to points” або скрипти (Python з rasterio) для кожної комірки модельної сітки, отримують з усіх підготовлених растрових шарів дані та записують їх у структурований текстовий файл у форматі, який відповідає моделі.

Отже, ГІС-інструменти забезпечують необхідну гнучкість для роботи з різнорідними вихідними даними, приведення їх до єдиної просторової основи та форматування відповідно до специфічних вимог вашої математичної моделі, а GeoNode допомагає все це організувати та візуалізувати.

Таким чином, поєднання функціоналу ГІС для обробки даних, відкритих геопросторових даних та можливостей платформи GeoNode для управління даними створює надійну основу для формування вхідної інформації та проведення комплексного моделювання поширення мікропластику в атмосфері.

3.2. Математична модель поширення мікропластику від точкових джерел

Поширення мікропластику в атмосфері є важливою екологічною проблемою, особливо в контексті діяльності об'єктів поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ). Викиди мікропластику, спричинені процесами механічного подрібнення, транспортування та розкладу полімерних матеріалів, можуть розноситися вітром на значні відстані, осідати в навколишньому середовищі та забруднювати водойми та ґрунти [5].

Загалом, для ефективного моніторингу мікропластику в атмосфері необхідно удосконалювати методологію, стандартизувати процедури та покращити заходи контролю якості. Це дозволить забезпечити точність і надійність результатів, що, в свою чергу, допоможе краще оцінювати рівень забруднення і розробляти ефективні заходи для його зменшення. Використання ефективних і точних методів моделювання та моніторингу поширення мікропластику в навколишньому середовищі є ключовим етапом для оцінки його впливу на екосистеми та здоров'я людини [6, 7, 8].

Метою даного параграфу є побудова математичної моделі поширення концентрації мікропластику в атмосфері внаслідок діяльності підприємств сфери поводження з ТПВ, які займаються подрібненням пластику. Розроблені

моделі є основою математичного забезпечення для інтеграції у ГІС для моніторингу забруднення навколо об'єктів сфери поводження з ТПВ.

Збір матеріалів дослідження проводився впродовж 2024 року на базі ПП «Катруб» у селищі Микулинці, Тернопільського району. ПП «Катруб» – провідне підприємство у сфері поводження з ТПВ, яке здійснює вивезення, утилізацію ТПВ та переробляє їх в місті Тернопіль та області. Підприємство має у своєму розпорядженні повний комплекс рециклінгу і виробляє якісну вторинну гранулу:

- HDPE (High-Density Polyethylene) – поліетилен високої щільності, який характеризується високою міцністю, стійкістю до хімічних речовин і використовується для виготовлення труб, каністр, пластикових контейнерів тощо.

- LDPE (Low-Density Polyethylene) – поліетилен низької щільності. Гнучкий, м'який матеріал, який застосовується для виробництва пакетів, плівок, ізоляції для кабелів.

- PP (Polypropylene) – поліпропілен. Має високу термостійкість і міцність, широко використовується у виробництві упаковки, деталей автомобілів, медичних виробів, текстильних волокон.

Обробка зібраних даних та аналіз зразків проводилася на базі Лабораторії екологічної безпеки та захисту довкілля та Лабораторії хімічного аналізу та досліджень навколишнього середовища Західноукраїнського національного університету.

Було обрано 18 пунктів спостереження (рис. 3.2), на яких було здійснено депозицію мікропластиків.

Точки 1, 2, 3 в яких розміщені витяжки цеху в якому здійснюють подрібнення ТВП відповідають точковим джерелам викидів. Кожен з них був обладнаний збирачем осадження. Окремо досліджували вміст мікропластиків у повітрі шляхом примусового фільтрування (до уваги брали 10 м³ повітря, яке пропускалося через фільтруючий елемент). Підрахунок і оцінка кількості мікропластиків проводилася методами оптичної мікроскопії. Тому в

дослідженнях до уваги було взято мікропластики розмірами від 10 мкм. Обстеження проводилися чотири рази на рік в періоди 14-16 лютого, 15-17 квітня, 15-17 липня, 15-17 жовтня 2024 року.

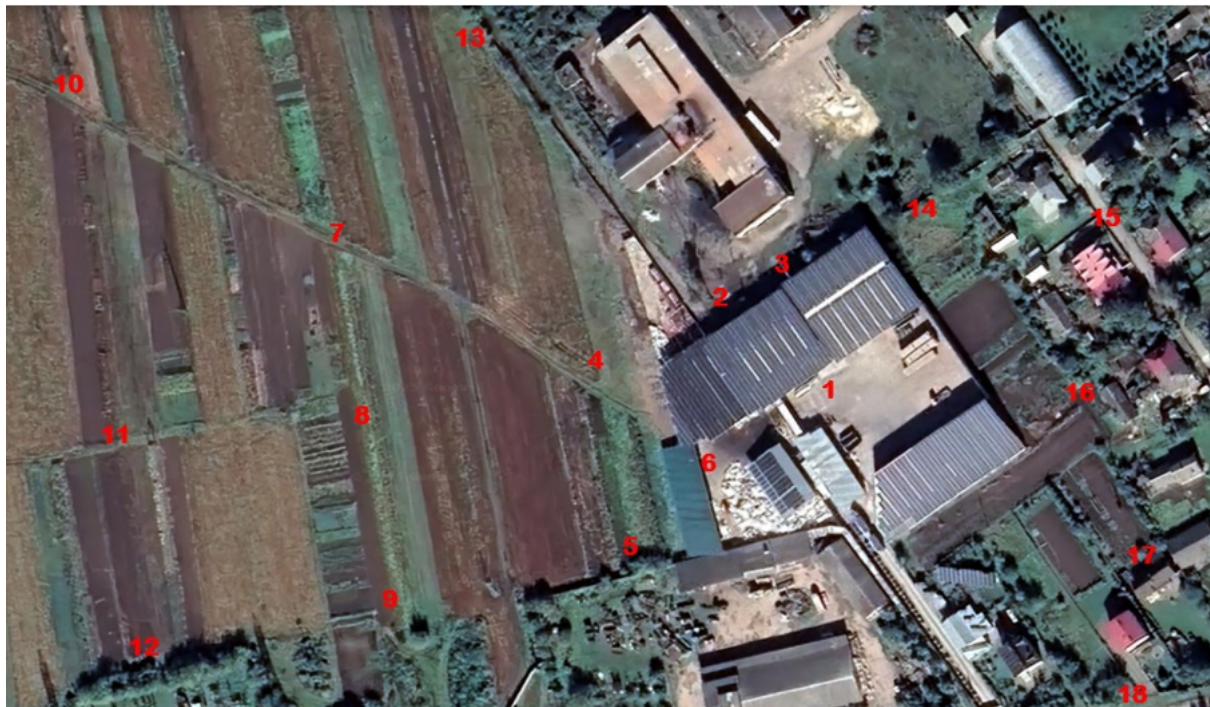


Рис. 3.2. Ділянка проведення експериментів, на якій розміщено цех підприємства з подрібнення ТПВ

Усереднені за періодами обстеження дані використовувалися для побудови моделі, та інтервальні дані – для верифікації моделей. В таблиці 3.1 наведено приклад результатів вимірювань в лютому місяці. Для решти періодів було отримано аналогічні результати.

Для розрахунку параметрів рівняння дифузії-адвекції-реакції (2.1) було систематизовано дані про погодні умови в період проведення експериментів (див. Табл. 3.2).

Вологість повітря зафіксовано для кожного періоду з такими значеннями: лютий – 86%, квітень – 82%, липень – 66%, жовтень – 87%.

Таблиця 3.1.

Результати експериментальних вимірювань концентрації мікропластику в
період 14-16 лютого 2024 року

Номер точки	x	y	z	Концентрація МП в повітрі, розрахована на основі показника депозиції, од/м ³	Середня за добу концентрація МП в повітрі, визначена примусовим фільтруванням, од/м ³	Розрахункова середня за добу концентрація МП в повітрі, од/м ³
1 (джерело)	73	150	4	1046.48	561	803.74
2 (джерело)	59	132	4	903.61	602	752.81
3 (джерело)	54	142	4	953.70	604	778.85
4	70	112	1	208.10	168	188.05
5	100	117	1	38.21	68	53.11
6	86	130	1	92.46	76	84.23
7	48	70	1	3.74	9	6.37
8	78	73	1	15.70	15	15.35
9	110	74	1	17.55	14	15.78
10	25	25	1	6.72	3	4.86
11	82	33	1	5.97	1	3.49
12	116	37	1	5.60	1	3.30
13	15	90	1	52.27	44	48.14
14	45	165	1	87.70	54	70.85
15	46	195	1	10.08	2	6.04
16	75	192	1	83.20	61	72.10
17	102	200	1	40.29	27	33.65
18	125	200	1	64.90	47	55.95

Для врахування компонентів адвекції було проведено аналіз напрямків та швидкості вітру, на основі яких визначалися значення v_x , v_y , v_z . Побудовані діаграми вітрів (роза вітрів) наведено на рис. 3.3.

У даній роботі для чисельного розв'язання рівняння дифузії-адвекції-реакції (2.1) використано метод скінчених об'ємів та засоби MATLAB 24.2.0.2871072 (R2024b) Update 5 [12].

Обчислювальна сітка визначається параметрами $L_x = 200$ м, $L_y = 120$ м, $L_z = 20$ м та кількістю вузлів $N_x = N_y = N_z = 20$.

Таблиця 3.2

Зведені метеорологічні умови в період проведення експериментів

14-16 лютого 2024 року

Дискрета спостереження	Дата	Час, год:хв	Напрямок вітру, градуси	Швидкість вітру, м/с	Температура повітря, °C	Опади, мм
1	14.02.24	2:00	90	7	+2.3	2
2	14.02.24	5:00	90	6	+2.2	2
3	14.02.24	8:00	90	8	+1.5	2
4	14.02.24	11:00	90	6	+2.5	
5	14.02.24	14:00	90	7	+2.9	
6	14.02.24	17:00	90	6	+3.7	
7	14.02.24	20:00	90	1	+0.4	
8	14.02.24	23:00	180	2	-0.6	
9	15.02.24	2:00	180	1	-1.4	
10	15.02.24	5:00	-	0	-1.1	
11	15.02.24	8:00	-	0	-3.2	
12	15.02.24	11:00	-	0	+1.6	
13	15.02.24	14:00	90	1	+3.3	
14	15.02.24	17:00	0	2	+1.3	
15	15.02.24	20:00	-	0	-0.4	
16	15.02.24	23:00	0	2	-0.8	
17	16.02.24	2:00	0	2	-1.1	
18	16.02.24	5:00	335	2	-1.2	
19	16.02.24	8:00	335	2	-1.4	
20	16.02.24	11:00	335	3	-0.2	
21	16.02.24	14:00	335	2	+3.5	
22	16.02.24	17:00	335	4	+3.4	
23	16.02.24	20:00	-	0	+2.1	
24	16.02.24	23:00	335	2	+1.8	

Для точного опису розповсюдження частинок використано високу роздільну здатність (20 вузлів у кожному напрямку). Час дискретизації $dt = 3600$ с. Швидкість осадження $v_s = 0.001 \frac{m}{c}$ та базовий коефіцієнт седиментації $\lambda_0 = 0.01 \frac{1}{c}$.

Початкові умови було задано нулевим розподілом концентрації МП у розрахунковій області, окрім джерел забруднення:

$$C(x, y, z, 0) = 0, x = \overline{1, L_x}, y = \overline{1, L_y}, z = \overline{1, L_z}.$$

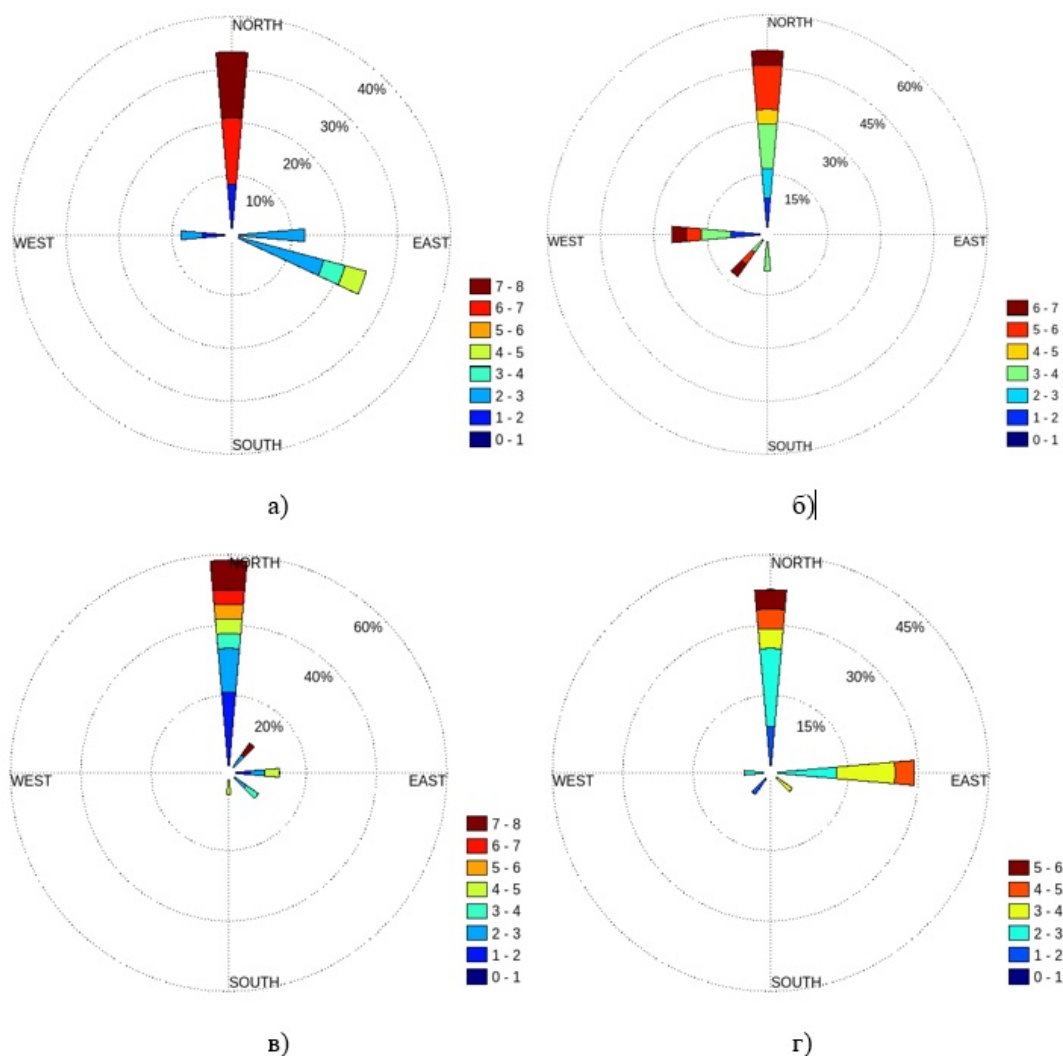


Рис. 3.3. Напрямок та швидкість вітру (роза вітрів) на час проведення експериментів: а) лютий, б) квітень, в) липень, г) жовтень.

Граничні умови в точках розміщення джерел забруднення було задано умовами Діріхле, що відповідає постійним значенням вимірюваних концентрацій у витяжках цеху подрібнення пластику, наприклад для зимового періоду проведення експерименту було отримано такі значення:

$$C(73,150,4,t) = 803.74, t > 0,$$

$$C(59,132,4,t) = 752.81, t > 0,$$

$$C(54,142,4,t) = 778.85, t > 0.$$

Граничні умови на межах області було задано умовами Неймана:

$$\left. \frac{dC(x, y, z, t)}{dx} \right|_{x=0} = 0, \left. \frac{dC(x, y, z, t)}{dx} \right|_{x=L_x} = 0;$$

$$\left. \frac{dC(x, y, z, t)}{dy} \right|_{y=0} = 0, \left. \frac{dC(x, y, z, t)}{dy} \right|_{y=L_y} = 0;$$

$$\left. \frac{dC(x, y, z, t)}{dz} \right|_{z=0} = 0, \left. \frac{dC(x, y, z, t)}{dz} \right|_{z=L_z} = 0,$$

що забезпечує реалістичне відображення відкритої атмосфери. У випадку дискретного представлення для методу скінченних різниць, умови будуть мати такий вигляд:

$$\begin{cases} C(0, y, z, t) = C(1, y, z, t) = C(2, y, z, t), \\ C(x, 0, z, t) = C(x, 1, z, t) = C(x, 2, z, t), \\ C(x, y, 0, t) = C(x, y, 1, t) = C(x, y, 2, t), \\ C(L_x, y, z, t) = C(L_x - 1, y, z, t) = C(L_x - 2, y, z, t), \\ C(x, L_y, z, t) = C(x, L_y - 1, z, t) = C(x, L_y - 2, z, t), \\ C(x, y, L_z, t) = C(x, y, L_z - 1, t) = C(x, y, L_z - 2, t). \end{cases}$$

Дані про вітер, вологість і опади отримані з вимірювань та введені в модель як змінні параметри обчислення. Результати побудови моделей на основі даних для різних сезонів року наведено на рис. 3.4.

Для верифікації отриманих моделей використовувалися результати вимірювань та побудовані карти поширення забруднень на основі виміряних даних. Результати побудови таких карт на основі крігінгу концентрацій мікропластику між виміряними точками наведено на рис. 3.5.

Крігінг є одним із найпоширеніших методів, проте він має низку обмежень:

- висока чутливість до вибору варіограми та припущень щодо просторової кореляції даних;

- неможливість коректної роботи з обмеженими вибірками та розрідженими вимірюваннями;

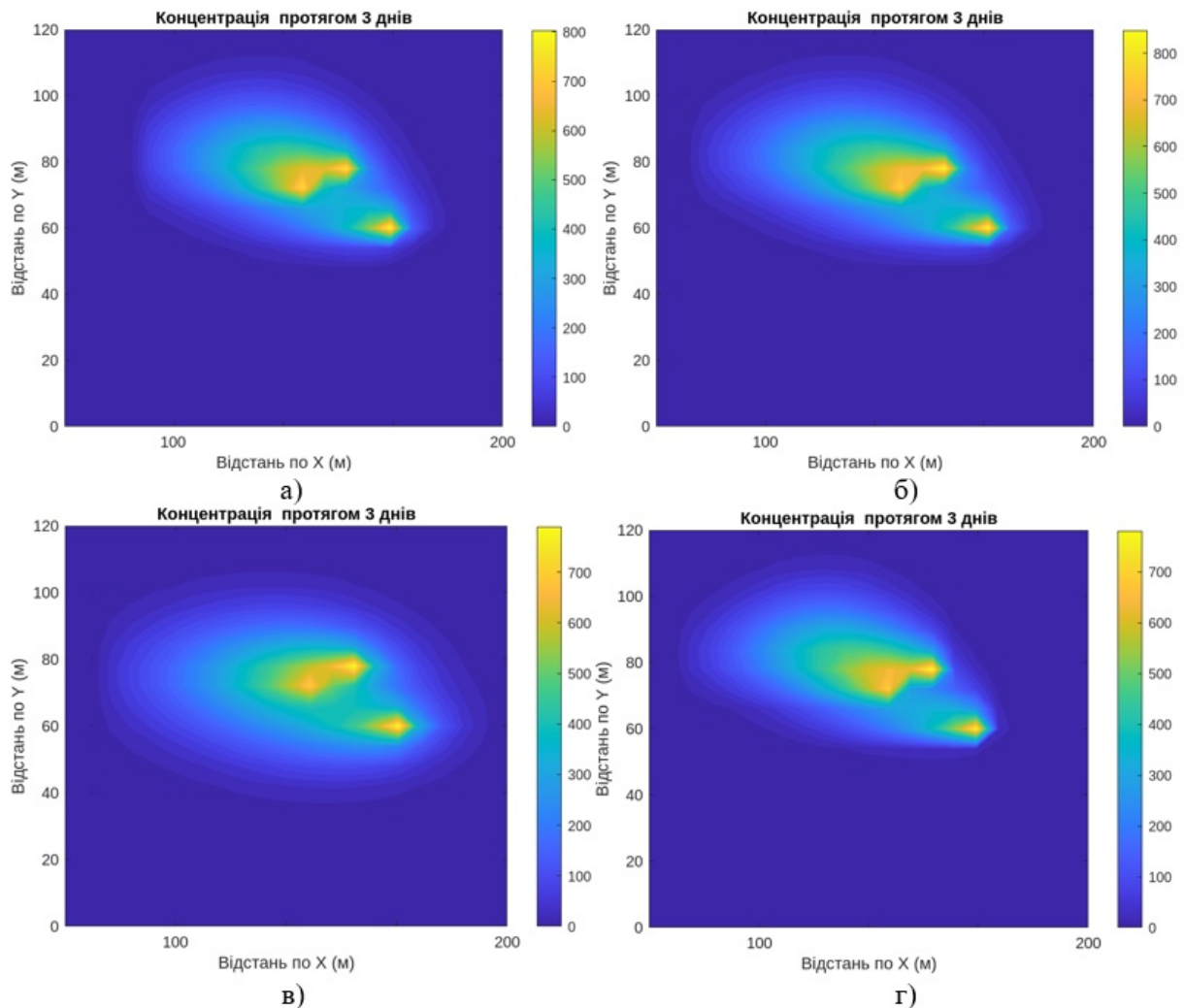


Рис. 3.4. Результати моделювання поширення концентрації мікропластику за місяцями: а) лютий, б) квітень, в) липень, г) жовтень

- необхідність виконання додаткових налаштувань для отримання коректних прогнозів [13].

Як альтернативу крігінгу для подальших досліджень запропоновано інтервальні дані та адаптивне налаштування параметрів, яке проводять на основі малої вибірки даних вимірювань. Їхні переваги:

- можливість оцінювання невизначеності вимірювань та обмежених вибірок;

- відсутність необхідності припущень щодо просторової кореляції даних;

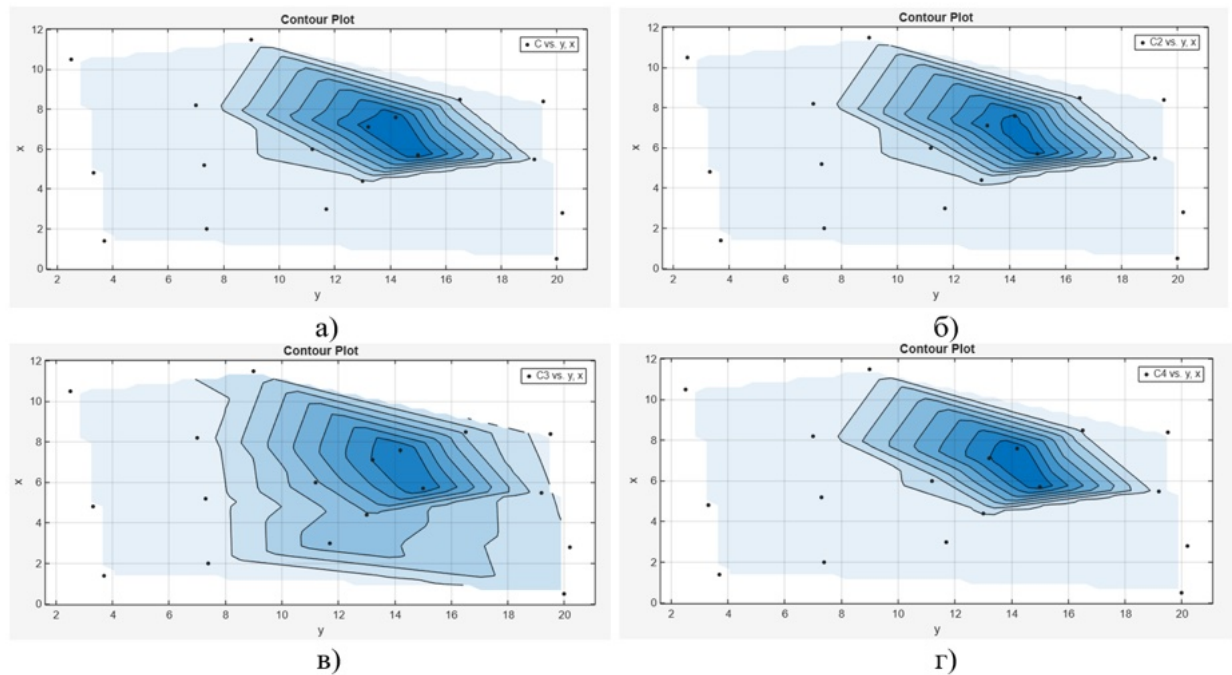


Рис. 3.5. Апроксимована область поширення мікропластику за результатами експериментальних вимірювань для верифікації моделей за місяцями: а) лютий, б) квітень, в) липень, г) жовтень

- нижча обчислювальна ефективність порівняно з крігінгом [14].

Таблиця 3.3. демонструє результати верифікації моделі за період місяця лютого на основі адаптивного налаштування параметрів рівняння АДР (2.1) на основі запропонованого методу в пункті 2.3. В якості навчальної та контрольної вибірки використали інтервальні значення, які отримано на основі застосування різних методів ідентифікації мікропластику в повітрі, що було зазначено вище. Також для підвищення точності верифікації чисельних моделей поширення мікропластику можливе застосування гібридних методів, що комбінують переваги інтервального аналізу та традиційних статистичних методів (наприклад, машинного навчання для адаптивної обробки даних).

Таблиця 3.3.

Результати верифікації моделі на основі навчальної
та контрольної вибірок

Номер точки вимірювання	Інтервальні значення концентрації мікропластику, од/м ³	Змодельовані значення
Навчальна вибірка		
4	[168; 208.1]	201.25
5	[38.21; 68]	62.78
7	[3.74; 9]	8.01
9	[14; 17.55]	16.92
10	[3; 6.72]	5.90
11	[1; 5.97]	4.97
12	[1; 5.6]	4.68
13	[44; 52.27]	49.81
14	[54; 87.7]	64.72
15	[2; 10.08]	7.95
17	[27; 40.29]	30.15
18	[47; 64.9]	50.55
Контрольна вибірка		
6	[76; 92.46]	89.50
8	[15; 15.7]	15.58
16	[61; 83.2]	66.18

Аналіз результатів моделювання поширення мікропластику показує, що сезонні зміни параметрів атмосфери можуть суттєво впливаючи на результати розрахунків. Зокрема, зимою нижча температура та зменшена турбулентність сприяють меншій дифузії, що призводить до локалізації забруднення навколо джерела. Збільшення осадження через конденсацію вологи на частинках також впливає на зменшення концентрації в повітрі.

Посилення вітрової активності весною сприяє ширшому горизонтальному переносу, що може збільшувати зону розсіювання забруднення. Високі температури в літній період підвищують турбулентність, що збільшує коефіцієнти дифузії. Також, менша вологість і незначні опади зменшують швидкість осідання мікропластику. Осінній період із варіативною

турбулентністю та середнім рівнем вологості дає результати, що є проміжними між літніми та зимовими сценаріями.

Відповідно, розроблені моделі є основою математичного забезпечення для інтеграції у комп'ютерну систему для моніторингу забруднення навколо об'єктів сфери поводження з ТПВ, зокрема заводів переробки сміття, де є процеси подрібнення пластику [15].

3.3. Модель поширення мікропластику для оцінки впливу на довкілля сміттєзвалищ

Актуальним є вивчення механізмів утворення мікропластичних мас на сміттєзвалищах, їх потрапляння у довкілля та розробка моделей поширення у середовищі з урахуванням місцевих умов. З 1950 року загальне виробництво пластику становить більше 8,3 млрд. т, при чому 2/3 цього обсягу потрапило у довкілля. Лишень 9% пластикових відходів потрапляють на переробні підприємства, близько 12% йдуть на генерацію тепла і енергії, а решта – 79% – нагромаджуються у природі та сміттєзвалищах [165].

Сміттєзвалища є значним джерелом мікропластику у довкіллі, що потребує постійного моніторингу [4]. Дослідженнями проблеми визначені певні закономірності. Так концентрація мікропластику суттєво залежить від сезонних факторів та атмосферних умов [83], а висока вологість ($>70\%$), як і опади, сприяє прискоренню вологого осадження частинок, що зменшує їх концентрацію в повітрі. Висота змішування повітря відіграє ключову роль у розсіюванні мікропластику – при більшій висоті частки мікропластику рівномірніше розподіляються в атмосфері.

У цьому параграфі розглядається розробка математичної моделі для опису поширення мікропластику (МП) зі сміттєзвалищ, що є складними, поверхневими джерелами забруднення. На відміну від точкових джерел, тут процеси вивільнення та поширення мікропластику мають свої особливості, які необхідно врахувати при моделюванні. Математична модель має забезпечити

можливість прогнозування просторово-часового розподілу концентрації МП у приземному шарі атмосфери навколо сміттєзвалища, оцінку надходження МП у ґрунти та ґрунтові води, визначення зон підвищеного ризику забруднення та оцінку ефективності різних стратегій зменшення забруднення.

Розглянемо детальніше процеси розкладання та шляхи поширення мікропластику зі сміттєзвалищ. Мікропластик (МП) утворюється та поширюється зі сміттєзвалищ різними шляхами, пов'язаними з процесами розкладання відходів та впливом зовнішніх факторів. До процесів розкладання можна віднести первинне та вторинне утворення МП.

До первинних процесів утворення МП відноситься фрагментація макропластику внаслідок фізичного, хімічного та біологічного руйнування великих пластикових виробів, що потрапляють на сміттєзвалище. Фізичні процеси передбачають механічний вплив (стиснення, тертя), УФ-випромінювання (фотодеградація), температурні коливання, які призводять до утворення тріщин, розшарування та розпаду пластику на дрібніші частинки. Хімічні процеси включають гідроліз, окислення, термічне розкладання сприяють деструкції полімерних ланцюгів. Біологічні процеси обумовлюються мікроорганізмами (бактерії, грибки), які можуть розкласти деякі види пластиків, хоча цей процес зазвичай є повільним.

Вторинне утворення МП обумовлене вивільненням з композитних матеріалів. МП може вивільнятися з будівельних матеріалів, текстилю, косметичних засобів та інших виробів, що містять пластик і потрапляють на сміттєзвалище.

Основними шляхами поширення є атмосферне поширення, поширення у водне середовище та поширення у ґрунти.

Атмосферне поширення включає вітрову ерозію та викиди під час обробки відходів: Дрібні частинки МП з поверхні сміттєзвалища легко піднімаються вітром і переносяться на значні відстані. Також операції на сміттєзвалищі, такі як перемішування, сортування та транспортування

відходів, можуть призводити до утворення та викиду в повітря великої кількості МП.

Поширення у водне середовище відбувається на основі фільтрації та вимивання. Дощова та тала вода, проходячи через тіло сміттєзвалища, вимиває МП та інші забруднюючі речовини, формуючи забруднений фільтрат, який може потрапляти у ґрунтові води та відкриті водойми. Також частинки МП можуть змиватися з поверхні сміттєзвалища під час сильних дощів і потрапляти у прилеглі водні об'єкти.

Поширення у ґрунти відбувається через захоронення відходів, осадження з атмосфери: МП безпосередньо потрапляє у ґрунт разом із захороненими відходами та застосування фільтрату для зрошення полів. Відповідно МП, що переноситься повітрям, може осідати на поверхню ґрунту або безпосередньо потрапляє у ґрунт разом із захороненими відходами. У деяких випадках, забруднений фільтрат може використовуватись для зрошення, що призводить до забруднення ґрунтів МП.

Процес моделювання поширення МП в атмосферу навколо сміттєзвалищ на основі рівняння АДР має особливості за рахунок поверхневого джерела. Розглянемо математичне формулювання задачі опису сміттєзвалища як джерела викидів, яке враховує дискретизацію області дослідження. Відповідно задача полягає у визначенні точок дискретної сітки, які належать поверхні сміттєзвалища та є джерелами викидів МП.

Визначення площі сміттєзвалища є важливим етапом оцінки викидів забруднюючих речовин. Існує кілька підходів до визначення площі сміттєзвалищ, які відрізняються за точністю, вартістю та необхідними ресурсами.

Наземні методи включають геодезичні вимірювання – традиційний метод, що передбачає використання геодезичних інструментів (тахеометрів, GPS-приймачів) для вимірювання координат меж сміттєзвалища. Забезпечує високу точність, але є трудомістким та потребує значних витрат на обладнання та фахівців.

Дистанційні методи включають отримання зображень сміттезвалища з літаків або безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Забезпечує високу роздільну здатність та можливість отримання даних про великі площі, але потребує спеціального обладнання та обробки зображень. Також можливе використання зображень, отриманих з супутників дистанційного зондування Землі. Забезпечує регулярне покриття великих територій, але має нижчу роздільну здатність, ніж аерофотозйомка. Може бути корисним для моніторингу змін площі сміттезвалища з часом.

Нехай задано двовимірну область P , що представляє площу сміттезвалища та множину дискретних точок:

$$D = \{d_i\}, d_i = (x_i, y_i), i = \overline{1, N},$$

де x_i, y_i – координати i -ї точки, які представляють положення джерела на дискретній сітці.

Задача полягає у визначенні того, чи належить кожна точка d_i з множини D області P . Розв'язання цієї задачі залежить від способу математичного представлення області P .

У випадку, коли межі області S задані у вигляді замкнутої кривої, що окреслює межу P , використаємо параметричне рівняння замкнутої кривої такого вигляду, що окреслює межу P :

$$r(t) = (x(t), y(t)), a \leq t \leq b,$$

де $r(t)$ – це векторна функція, яка описує положення точки на кривій у двовимірному просторі, $x(t), y(t)$ – це функції, які визначають координати x та y точки на кривій у залежності від параметра t .

Для кожної точки $d_i = (x_i, y_i), i = \overline{1, N}$ потрібно визначити, чи знаходиться вона всередині кривої, що визначає межу області P . Для цього можна використовувати алгоритми перевірки входження точки в полігон, наприклад, метод трасування променем (ray casting) або метод підрахунку кількості перетинів.

Для випадку, коли межі області P задані у вигляді полігону на основі множини точок $(x_1, y_2), (x_3, y_4), \dots, (x_N, y_N)$ – координат вершин багатокутника, що окреслює межу P , які впорядковані за напрямком обходу (проти годинникової стрілки). При цьому для кожної точки застосовуються алгоритми перевірки входження точки в полігон.

Для випадку, коли область P задано у вигляді растрового зображення $Image(x, y)$, значення пікселів вказують чи належить дана точка до області P .

Для кожної точки $d_i = (x_i, y_i), i = \overline{1, N}$ здійснюється перетворення координати (x_i, y_i) у координати пікселя $(x_{pixel}^i, y_{pixel}^i)$ на растровому зображенні. Умовою належності точки з координатами (x_i, y_i) області P є умова $Image(x_{pixel}^i, y_{pixel}^i) = 1$.

У нашому випадку використовуються дані з геоінформаційних систем, що забезпечує легку інтеграцію даних, отриманих різними методами, їхньої просторової обробки та аналізу. Використання векторизації растрових зображень для визначення полігона меж сміттєзвалища, дозволяє обчислювати площу полігона, враховуючи проекцію та систему координат.

Також інструменти ГІС використовуються для накладання даних про межі сміттєзвалища на інші географічні дані (наприклад, кадастрові карти, дані про землекористування). У більшості випадків комбінація дистанційних методів (для отримання загальної картини) та ГІС (для обробки, аналізу та інтеграції даних) є найбільш ефективним підходом для визначення площі сміттєзвалищ.

Дослідження проводилося на полігоні ТПВ, яке знаходиться біля с. Плебанівка Тербовлянської територіальної громади, на якому розташована сміттєсортувальна лінія ПП «Катруб» (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Теребовлянський полігон ТПВ (с. Плебанівка)

Виміри проводилися чотири рази в різні сезони року – 06.02.2024, 06.04.2024, 06.07.2024 та 05.10.2024 року. В якості засобу детекції завислих частинок у повітрі різного розміру (PM 2.5, 10) використовувався пристрій-аналізатор завислих частинок KORNO-1000GTM. Для детекції частинок KORNO-1000GTM використовує принцип лазерного розсіювання. Для проведення лабораторних досліджень використовувалися виміри на основі депозиції мікропластику, на основі яких визначався інтервальний відсоток $[P_{min}; P_{max}]$ вмісту мікропластику у ЗР. При цьому враховувалася також похибка KORNO-1000GTM, яка рівна 3% та похибка лабораторного обладнання (табл. 3.4).

Отримані результати проведення експериментальних вимірювань та визначення інтервальних значень вмісту мікропластику для проведення адаптивного налаштування моделі, відповідно дат та точок замірів наведено у табл. 3.5.

Таблиця 3.4.

Результати визначення діапазону (інтервалу) відсоткового вмісту МП

Дати замірів	P_{min}	P_{max}
06.02.2024	0.15	0.25
06.04.2024	0.17	0.28
06.07.2024	0.16	0.28
05.10.2024	0.12	0.2

Як продемонстрували результати вимірювань сезонні коливання в показниках депозиції мікропластиків в районі полігону незначні. Більшу роль відіграють кліматичні фактори (вологість повітря, кількість опадів), що ілюструють дані таблиці 3.5.

Приклад деталізованого аналізу метеорологічних умов для врахування адвекції, дифузії та реакції (сухого та вологого осадження) мікропластику в моделі для зимового періоду наведено у таблиці 3.7. В додатку наведено аналогічні дані для решти періодів вимірювань.

Важливе значення мають тип і вік сміттєзвалища – на старих полігонах мікропластик утворюється шляхом постійної деградації великих пластикових фрагментів, а інтенсивність деградації зростає зі старінням пластмас [92].

Мікропластик у відходах полігонів зростає з віком і глибиною, а склад мікропластику змінюється з часом: у нових відходах спостерігають більше різноманіття полімерів, а інтенсивність міграції деградованих фрагментів мікропластиків углиб полігону (тіла сміттєзвалища) прямо залежить від ступеня фрагментації матеріалу [84]. Це й визначило необхідність дослідження дощових фільтратів, які утворюються на полігоні і стають джерелом походження мікропластиків у повітрі в районі досліджуваного об'єкта.

Лічати (фільтрати сміттєзвалищ) містять значні кількості мікропластиків і чим дрібніші частинки, тим вони мобільніші і швидше поширюються, в тому числі переходячи з рідких розчинів у атмосферне повітря.

Фільтрати полігонів містять дрібніші частинки мікропластику через тривалий процес деградації пластику [75].

Таблиця 35.

Результати експериментальних вимірювання

Точка вимірювання	Дати замірів	Концентрація МП, розрахована на основі показника депозиції, МП/м ³	Концентрація ЗР (PM _{2.5} + PM ₁₀), PC/м ³	Інтервальні значення концентрації МП на основі методики, $[C(x, y, z, t)^-; C(x, y, z, t)^+]$
1	06.02.2024	18.7	10380	[15.57; 25.95]
1	06.04.2024	24.4	11905	[20.2385; 33.334]
1	06.07.2024	27.5	13240	[21.184; 37.072]
1	05.10.2024	6.4	3840	[4.608; 7.68]
2	06.02.2024	6.2	2750	[4.125; 6.875]
2	06.04.2024	8.3	3286	[5.5862; 9.2008]
2	06.07.2024	10.0	4060	[6.4960; 11.368]
2	05.10.2024	0.0	1022	[0; 2.044]
3	06.02.2024	7.7	3626	[5.439; 9.065]
3	06.04.2024	10.3	4726	[8.0342; 13.2328]
3	06.07.2024	12.5	6604	[10.5664; 18.4912]
3	05.10.2024	0.0	1117	[0; 2.234]
4	06.02.2024	11.9	5886	[8.829; 14.715]
4	06.04.2024	15.5	7147	[12.1499; 20.0116]
4	06.07.2024	17.5	8756	[14.0096; 24.5168]
4	05.10.2024	4.1	2704	[3.2448; 5.408]

Відбір проб лічату і ґрунтів проводився у визначених місцях згідно чинних методик відбору проб. Відбір зразків проводився у п'ятиразовому повторі, а результати наведені у таблиці 3.8. Слід зазначити, що показники в ґрунтах виявилися незначними і суттєво не впливають на поширення мікропластику в атмосфері.

Для моделювання поширення забруднення використовувалась двовимірне рівняння АДР, що передбачає поширення концентрації забруднення мікропластиком на висоті 1,5 від землі.

Таблиця 3.6.

Умови проведення вимірювань концентрації мікропластику та завислих речовин

Точка вимірювання	Дати вимірювань	Вологість повітря, %	Кількість опадів, мм
1, 2, 3, 4	06.02.2024	72	2
1, 2, 3, 4	06.04.2024	74	1
1, 2, 3, 4	06.07.2024	63	0
1, 2, 3, 4	05.10.2024	96	10

Таблиця 3.7.

Метеорологічні умови проведення вимірювань концентрації мікропластику та завислих речовин за 06.02.2024

День	Час	Вітер, градуси	Швидкість вітру, м/с	Температура повітря, С	Опади, мм	Явища погоди
06.02.2024	2:00	270	4	+4.7°	1	дощ слабкий безперервний
06.02.2024	5:00	270	13 м/с	+7.2°	1	дощ слабкий безперервний
06.02.2024	8:00	270	9 м/с	+7.5°		небо без змін
06.02.2024	11:00	270	10 м/с	+8.2°		небо без змін
06.02.2024	14:00	270	11 м/с	+8.9°		небо без змін
06.02.2024	17:00	270	10 м/с	+7.9°		
06.02.2024	20:00	270	9 м/с	+6.3°		
06.02.2024	23:00	270	7 м/с	+6°		

При цьому вважатимемо, що коефіцієнт реакції описує сумарний вклад сухого та вологого осадження. Обчислювальна сітка визначається параметрами $L_x = 720$ м, $L_y = 600$ м та кількістю вузлів $N_x = 240$, $N_y = 200$. Час дискретизації $dt = 3600$ с. Базовий коефіцієнт седиментації $\lambda_0 = 0.01 \frac{1}{c}$.

Координати поверхневого джерела забруднення у вигляді полігону $P(\vec{x}_0, \vec{y}_0)$ на обчислювальній сітці задано векторами $\vec{x}_0 = (100, 90, 103, 105, 120, 130, 156)$ та $\vec{y}_0 = (20, 30, 500, 110, 130, 130, 45)$ (Рис. 3.7).

Таблиця 3.8

Вміст мікропластику в фільтраті полігону ТПВ та ґрунтах

Точки забору зразків лічату	Вміст мікропластику в лічаті полігону, од/л	Вміст мікропластику в лічаті полігону, од/м ³	Точки забору зразків ґрунту	Вміст оптично видимого мікропластику в зразках ґрунту, од/кг сухого ґрунту
L1	1-9	1000-9000	S1	3-8
L2	1-5	1000-5000	S2	0-3
L3	1-4	1000-4000	S3	0-3

Початкові умови було задано нулевим розподілом концентрації МП у розрахунковій області, окрім джерел забруднення:

$$C(x, y, 1) = 0, x = \overline{1, L_x}, y = \overline{1, L_y}.$$



Рис. 3.7. Джерело забруднення у вигляді полігону

Граничні умови в точках розміщення джерел забруднення було задано умовами Діріхле, що відповідає постійним значенням вимірених концентрацій в межах полігону, що визначає площу сміттєзвалища, наприклад для зимового періоду проведення експерименту було отримано такі значення:

$$C(x_i, y_i, t) = 18.7, \forall (x_i, y_i) \in P(\vec{x}_0, \vec{y}_0), t > 0.$$

Граничні умови на межах області було задано умовами Неймана, як у задачі, що розглядалась у попередньому параграфі.

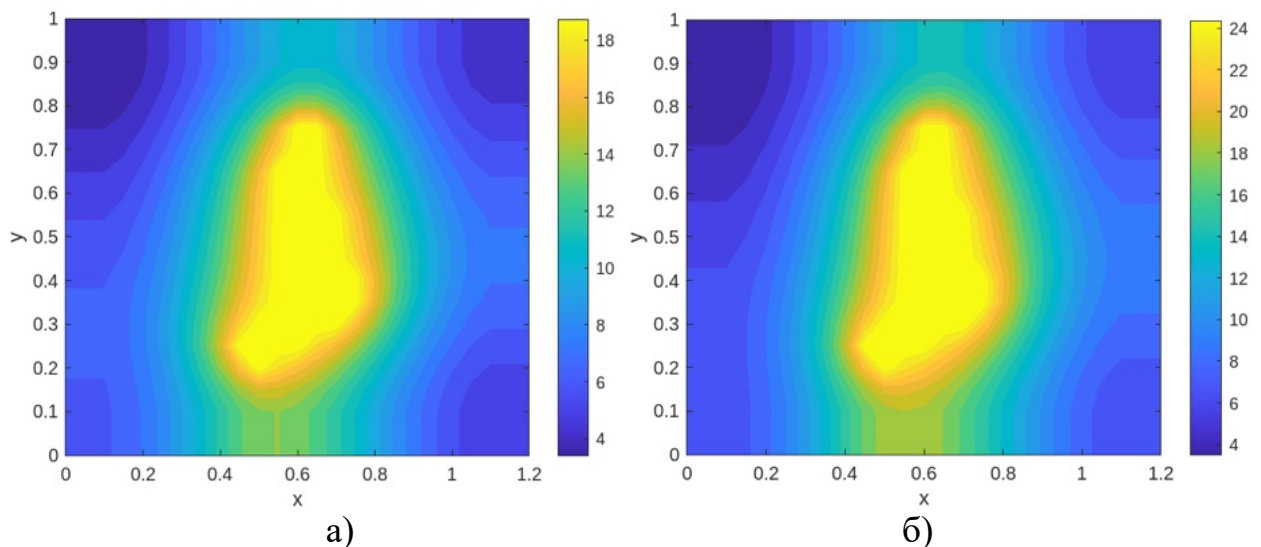
Результати моделювання та адаптивного налаштування моделі для всіх сезонів наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9.

Результати побудови та адаптивного налаштування параметрів моделей

Сезон	Параметри рівняння				
	v_x	v_y	D_x	D_y	λ_0
Зима	10	0.01	10	20	0.0089
Весна	7.2	3.1	40	30	0.005
Літо	6.3	3.2	60	40	0.003
Осінь	8.2	3.1	10	20	0.012

Графічне представлення полів концентрації мікропластику у повітрі у вигляді контурних графіків наведено на рисунку 3.8.



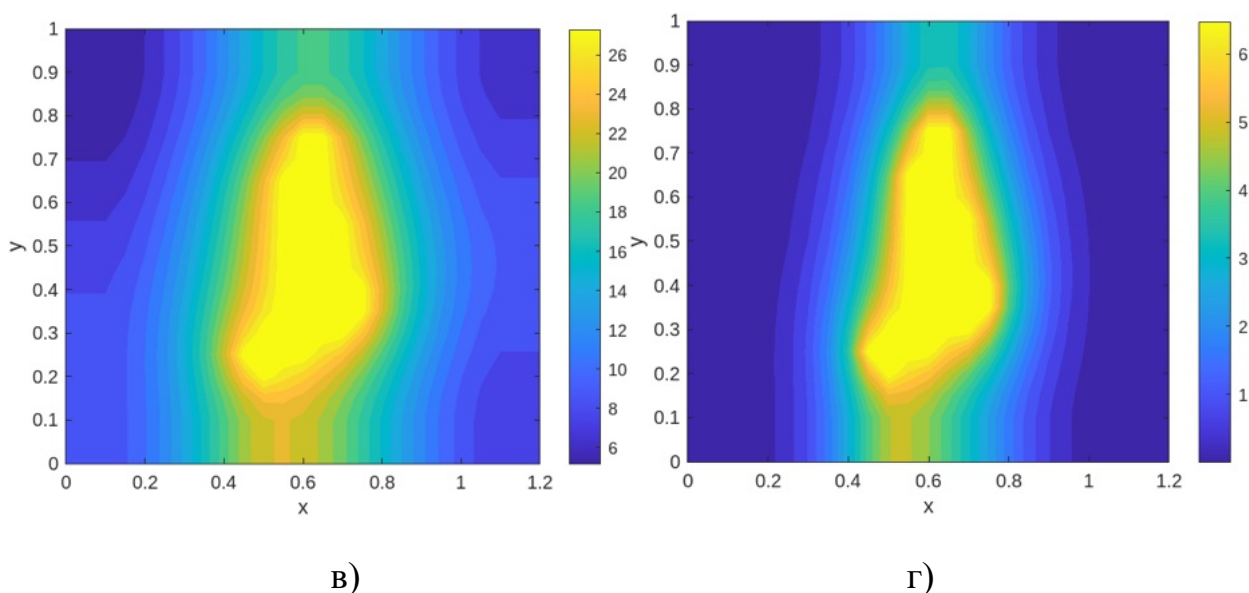


Рис. 3.8. Графічне відображення результатів моделювання поширення концентрації мікропластику за періоди проведення експериментів: а) зима, б) весна, в) літо, г) осінь.

Таблиця 3.10.

Результати адаптивного налаштування параметрів та верифікації моделі

Точка вимірювання	Дати замірів	Інтервальні значення концентрації МП на основі методики, $[C(x, y, z, t)^-; C(x, y, z, t)^+]$	Змодельовані значення
1	06.02.2024	[15.57; 25.95]	18.73
1	06.04.2024	[20.2385; 33.334]	28.17
1	06.07.2024	[21.184; 37.072]	29.05
1	05.10.2024	[4.608; 7.68]	5.79
2	06.02.2024	[4.125; 6.875]	05.08
2	06.04.2024	[5.5862; 9.2008]	8.55
2	06.07.2024	[6.4960; 11.368]	8.63
2	05.10.2024	[0; 2.044]	1.35
3	06.02.2024	[5.439; 9.065]	8.33
3	06.04.2024	[8.0342; 13.2328]	9.67
3	06.07.2024	[10.5664; 18.4912]	13.01
3	05.10.2024	[0; 2.234]	1.12
4	06.02.2024	[8.829; 14.715]	12.18
4	06.04.2024	[12.1499; 20.0116]	14.89
4	06.07.2024	[14.0096; 24.5168]	17.90
4	05.10.2024	[3.2448; 5.408]	4.25

Отримані результати є безумовним свідченням важливості моніторингу та моделювання поширення МП у повітрі біля сміттєзвалищ. Як продемонстрували експерименти, концентрація мікропластику в ґрунтах є незначною, що є свідченням того, що атмосфера є одним із основних шляхів перенесення мікропластику зі сміттєзвалищ.

В цілому, моніторинг повітря біля сміттєзвалищ є критично важливим з кількох причин:

- оцінка масштабів забруднення, оскільки він дозволяє визначити концентрацію МП у приземному шарі атмосфери та оцінити площу забруднення;
- моніторинг допомагає ідентифікувати конкретні джерела викидів МП на сміттєзвалищі (наприклад, певні операції з відходами);
- дані моніторингу використовуються для розробки та верифікація математичних моделей, які прогнозують подальше поширення МП у повітрі;
- дрібні частинки МП можуть проникати в дихальну систему людини, викликаючи запальні процеси та інші негативні наслідки для здоров'я. Моніторинг та моделювання поширення дозволяють оцінити ці ризики для населення, що проживає поблизу сміттєзвалища;
- на основі моделей поширення здійснюється розробка стратегій зменшення забруднення: Результати моніторингу є основою для розробки ефективних заходів щодо зменшення викидів МП зі сміттєзвалища (наприклад, оптимізація операцій з відходами, застосування покриттів);
- контроль за дотриманням екологічних норм дозволяє перевірити, чи не перевищують викиди МП встановлені нормативи та чи дотримується підприємство сфери поводження з ТПВ екологічних стандартів.

3.4. Математична модель поширення мікропластику в придорожній екосистемі внаслідок зносу шин

Але, не зважаючи на домінуючу частку мікропластику в морських та океанічних водах, морський розпил стає причиною потрапляння тільки 11% мікропластику в атмосферне повітря. Основна маса його, а це приблизно 84%, походить із дорожнього пилу. Майже 5% здійснюється із сільськогосподарських угідь, а менше 0,4% відносять до «популяційних джерел». Дорожній пил віднесли до основних джерел мікропластику в повітрі [84].

Автомобільні шини на чверть ($\approx 24\%$) складаються з синтетичного каучуку. Приблизно 15% – це натуральний каучук, але останнім часом тенденція на повне заміщення натурального каучуку ізопреновими. Незважаючи на добрі властивості цього матеріалу до стирання, наприклад, стійкість до зношування та силу тертя, експлуатація автомобільних шин призводить до їхнього швидкого зношування, особливо за наявності різних типів дорожнього покриття. Внаслідок цього до 78% мікропластику, який утворюється від зношування шин, потрапляє у водойми, в кінцевому результаті в океани. Автомобільні шини виявилися одними з найбільш небезпечних джерел забруднення навколишнього середовища мікропластиком.

При врахуванні того, що щороку виробляється близько двох мільярдів шин по всьому світу, ця проблема стає все більш актуальною. На кожен кілометр експлуатації звичайного автомобіля утворюється приблизно трильйон мікрочастинок шинного пилу. В окремих випадках забруднення від шинного пилу вже наближається за своєю шкідливістю до викидів з вихлопних труб автомобілів – є дослідження, які стверджують, що викиди мікрочастинок PM_{2,5} та PM₁₀ від стирання шин та гальмівних колодок та дисків перевищують обсяги викидів з вихлопних труб цих же автомобілів. Токсичний пил шин може бути найгіршим з усіх джерел забруднення

мікропластиком. Крім того, автомобільна шина містить значну кількість хімічних сполук (понад чотири сотні), які під час експлуатації викидаються у повітря у вигляді великих пилових мас.

Подальші дослідження поширення мікропластичних еластомерів у довкіллі ґрунтуються на інтенсивності транспортних потоків основними магістралями регіону (інтенсивність руху) та нормами зносу автомобільних шин за відповідний період.

Інтенсивність руху визначається кількістю транспортних засобів, які проходять автошляхом за певний період часу. Розрізняють питому та приведену інтенсивність руху. Перша описується інтенсивністю по одній смузі дороги. Для наших розрахунків, ми оперуємо наведеною інтенсивністю як сукупністю інтенсивностей руху транспортних засобів різного типу з урахуванням відповідних наведених коефіцієнтів для цих типів. Транспортний потік змішаний і врахувати окремо кожен тип транспортного засобу, їх групи, сезонність, покриття різних площ доріг з одного боку дуже складно, а з іншого це ускладнює обрахунки, а точності їм не додає. Тому ми використовуємо як показник інтенсивності кількість транспортних засобів, приведений до умовного легкового автомобіля за допомогою коефіцієнтів приведення (таблиця 3.11).

Таблиця 3.11

Коефіцієнти приведення транспортних засобів до легкового автомобіля*

	Тип транспортного засобу	Коефіцієнт приведення
1	Мотоцикл без коляски та мопед	0,5
2	Мотоцикл з коляскою	0,75
3	Легковий автомобіль	1,0
4	Вантажний автомобіль вантажопідйомністю, т: – до 1	1,0
	- від 1 до 2	1,5
	- від 2 до 6	2,0
	- від 6 до 8	2,5
	- від 8 до 14	3,0
	- понад 14	3,5
5	Автопоїзд вантажопідйомністю, т: -до 12	3,5
	- від 12 до 20	4,0

	- від 20 до 30	5,0
	понад 30	6,0
6	Колісний трактор з причепами вантажопідйомністю, т: – до 10	3,5
	- понад 10	5,0
7	Автобус	3,0
8	Довгомірний автобус	5,0

* Згідно з вимогами Додатку А ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги. Частина І. Проектування.

Частина ІІ. Будівництво».

Приведена інтенсивність руху до умовного легкового автомобіля дозволяє підрахувати кількість різних видів автотransпортних засобів, що рухаються проїжджою частиною і показує, якою кількістю легкових автомобілів можна замінити той або інший тип транспортного засобу.

Для прикладу, у таблиці 3.12 наведено дані про приведену інтенсивність руху автотransпортних засобів автодорогами різного значення Тернопільської області.

При розрахунку об'єму та маси стертої каучукового (гумового) матеріалу автомобільної шини взято наступні усереднені дані:

- усі транспортні засоби приведені до умовного легкового автомобіля, а тому для подальших розрахунків використано середній розмір автомобільної шини 195/65/R15, як найпоширенішої для цього класу автомобілів (рис. 3.9);

- глибина протектора нових літніх шин становить 7-9 мм, залишкова глибина протектора (після чого шину експлуатувати не дозволено) – 1,6 мм. Відповідно, глибина зносу – 6,9 мм. Нами для розрахунків взято – 8 мм. Глибина протектора зимових шин – 7-8 мм. Залишкова глибина протектора (після чого шину експлуатувати не дозволено) – 3-4 мм. Глибина зносу – 4 мм. Для подальших оцінок зносу взято середнє значення значення зносу за рік: $(8 + 4) / 2 = 6$ мм.

Діаметр нової автомобільної шини розміру 195/65/R15 – $D_1 = 635$ мм ($r_1 = 317,5$ мм).

Площа поверхні протектора (як циліндра) розраховується за формулою:

Таблиця 3.12

Приведена інтенсивність руху автотранспортних засобів автодорогами
різного значення Тернопільської області

	Ділянка	Інтенсивніс ть руху, авто/добу	Інтенсивніс ть руху, авто/рік	Кількість шин за рік
Міжнародні автомобільні дороги				
М-12	Стрий – Тернопіль – Кіровоград – Знам'янка			
	Бережани – Тернопіль	10200	3 723 000	14 892 000
	Тернопіль – Підволочиськ	19800	7 227 000	28 908 000
М-19	Доманове – Ковель – Тернопіль – Чернівці – Тереблече			
	Кременець – Тернопіль	12380	4 518 700	18 074 800
	Тернопіль – Теребовля	18140	6 621 100	26 484 400
	Теребовля – Заліщики	15280	5 577 200	22 308 800
Національні автомобільні дороги				
Н-02	Львів – Тернопіль	8500	3 102 500	12 410 000
Н-18	Івано-Франківськ – Бучач – Тернопіль	7600	2 774 000	11 096 000
Регіональні автомобільні дороги				
Р-24	Татарів – Косів – Коломия – Борщів – Кам'янець – Подільський	2350	857 750	3 431 000
Р-26	Острог – Кременець – Почаїв – Радивилів	4350	1 587 750	6 351 000
Р-32	Кременець – Біла Церква – Ржищів	3200	1 168 000	4 672 000
Р-39	Броди – Тернопіль	3910	1 427 150	5 708 600
Р-41	Обхід м. Тернополя	5820	2 124 300	8 497 200
Р-43	/М-19/ – Ланівці – /Р-32/	3780	1 379 700	5 518 800
Територіальні автомобільні дороги				
Т-20-01	Бучач – Чортків – Скала-Подільська			
Т-20-01	Бучач – Чортків	2860	1 043 900	4 175 600
Т-20-01	Чортків – Скала-Подільська	1670	609550	2 438 200
Т-20-02	Тернопіль – Скалат – Жванець	4600	1 679 000	6 716 000
Т-09-03	Галич – Підгайці – Сатанів	4580	1 671 700	6 686 800
Т-20-04	Бережани – Підгайці – Монастирська	2920	1 065 800	4 263 200
Т-20-06	Городище – Зарваниця – Бучач	3970	1 449 050	5 796 200
Т-20-07	Бережани – Нараїв – Брюховичі	980	357700	1430800
Т-20-08	Шумськ – Великі Дедеркали – /Р-32/	730	266450	1065800
Т-20-09	Вишнівець – Ланівці	810	295650	1182600
Т-20-10	Збараж – Підволочиськ	1170	427050	1708200
Т-20-11	Копичинці – Гусятин	460	167900	671600
Т-20-12	Ланівці – Лисогірка – Теофіполь	1080	394200	1576800
Т-20-13	Почаїв – Зборів	980	357700	1430800

* За даними з відкритих джерел та власних спостережень

$$S = (2 \cdot \pi \cdot r) \cdot 152 \text{ мм} = 2 \cdot 3.14 \cdot 317.5 \cdot 152 = 302999.84 \text{ мм}^2 (303 \text{ см}^2),$$

де, 152 мм – ширина контакту протектора з поверхнею дорожнього покриття.

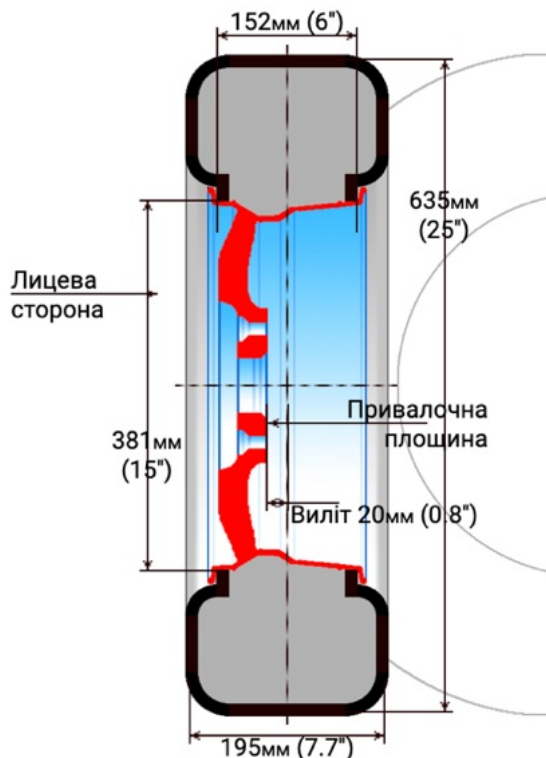


Рис. 3.9. Характеристики автомобільної шини

Об'єм стертого каучукового гумового матеріалу протектора:

$$V = S \cdot h \cdot 0.89 = 302999.84 \cdot 6 \cdot 0.89 = 1617939.04 \text{ мм}^3 (161.8 \text{ см}^3).$$

де 0.89 – коефіцієнт середньої щільності протектора.

Маса стертого каучукового гумового матеріалу протектора для транспорту (повний знос):

$$M = 4 \cdot 161.8 \text{ см}^3 \cdot 1.1 \text{ г/см}^3 = 711.2 \text{ г},$$

де 1.1 г/см³ – середня питома вага гумової автомобільної суміші.

Добовий знос каучукового гумового матеріалу протектора чотирьох коліс транспортного засобу:

$$M_d = 711.2 / 365 = 1.95 \text{ г/доба}.$$

Добова маса зношеного каучукового гумового матеріалу протектора чотирьох коліс транспортного засобу на ділянці дороги:

$$M_{\text{заг}} = M_{\text{д}} \cdot IP,$$

де IP – добова інтенсивність руху на відповідній ділянці

Сучасні автомобільні шини в середньому на 41% складаються з синтетичного каучуку. Є необхідність розрахувати масові частки компонентів гумової суміші (протекторної гуми) без армуючих компонентів (сталі), при чому треба мати на увазі, що для всіх частин шини використовують однакову гумову суміш.

Відповідно, встановлено такі співвідношення каучук (натуральний та синтетичний) – 45,6%; наповнювачі (сажа, діоксид кремнію, вуглець, крейда...) – 33,3%; поліестер, віскоза, нейлон – 5,6%; пластифікатори (олії та смоли) – 6,7%; хімічні речовини для вулканізації (сірка, оксид цинку...) – 6,7%; антивікові 2,1%.

Відповідно на долю еластомерів у складі протекторної суміші шини припадає 45,6%, а в автомобільній шині в цілому частка полімерів сягає: $45,6\% + 5,6\% = 51,2\%$.

На основі проведених розрахунків та статистичних даних було розраховано викиди в атмосферу на дорожній інфраструктурі тернопільської області (табл. 3.13).

Для апробації запропонованої моделі, яка включатиме лінійне джерело забруднення, проведемо моделювання поширення мікропластику на ділянці дороги Городище-Яструбово, довжина якої – 1 км (рис. 3.10).

Розрахована добова маса стертого еластомеру на 1 км – 0,06283 кг. Річний обсяг стертого еластомеру = $0,06283 \text{ кг} \times 365 = 22,93295 \text{ кг}$. Площа дорожнього асфальтного покриття = $4 \text{ м} \times 1000 \text{ м} = 4000 \text{ м}^2$. Кількість стертого еластомеру на 1 м^2 площі дорожнього покриття = $5,73324 \text{ г/м}^2$.

Таблиця 3.13

Добова маса стертого еластомера на 1 кілометр пройденого шляху
дорогами Тернопільської області

	Ділянка	Інтенсив ність руху, авто/доб у	Добова маса стертого шинного матеріал у, кг	Добова маса стертого еластоме ру (45,6%), кг	Довжина ділянки, км	Добова маса стертого еластоме ру кг на 1 км
Міжнародні автомобільні дороги						
М-12	Стрий – Тернопіль – Кіровоград – Знам'янка				106,4	
	Підвисоке – Бережани – Тернопіль	10200	19,788	9,023	66,3	0,13609
	Тернопіль – Підволочиськ	19800	38,412	17,516	40,1	0,43681
М-19	Доманове – Ковель – Тернопіль – Чернівці – Тереблече				200,7	
	Шепетин – Кременець – Тернопіль	12380	24,017	10,952	77,6	0,14113
	Тернопіль – Теребовля	18140	35,192	16,048	35,4	0,45333
	Теребовля – Заліщики	15280	29,643	13,517	87,7	0,15412
Національні автомобільні дороги						
Н-02	Львів – Тернопіль	8500	16,490	7,519	39,1	0,19230
Н-18	Івано-Франківськ – Бучач – Тернопіль	7600	14,744	6,723	73,6	0,09134
Регіональні автомобільні дороги						
Р-24	Татарів – Косів – Коломия – Борщів – Кам'янець – Подільський	2350	4,559	2,079	51,1	0,04068
Р-26	Острог – Кременець – Почаїв – Радивилів	4350	8,439	3,848	70,3	0,05474
Р-32	Кременець – Біла Церква – Ржищів	3200	6,208	2,831	30,9	0,09161
Р-39	Броди – Тернопіль	3910	7,585	3,459	40,7	0,08499
Р-41	Обхід м. Тернополя	5820	11,291	5,149	14,5	0,35510
Р-43	/М-19/ – Ланівці – /Р- 32/	3780	7,333	3,344	56,2	0,05950

Продовження таблиці 3.13

Територіальні автомобільні дороги						
T-20-01	Бучач – Чортків – Скала-Подільська				73,3	
T-20-01	Бучач – Чортків	2860	5,548	2,530	36,9	0,06856
T-20-01	Чортків – Скала-Подільська	1670	3,240	1,477	36,4	0,04058
T-20-02	Тернопіль – Скалат – Жванець	4600	8,924	4,069	171,8	0,02368
T-09-03	Галич – Підгайці – Сатанів	4580	8,885	4,052	119,4	0,03394
T-20-04	Бережани – Підгайці – Монастирська	2920	5,665	2,583	47,6	0,05426
T-20-06	Городище – Зарваниця – Бучач	3970	7,702	3,512	55,9	0,06283
T-20-07	Бережани – Нараїв – Брюховичі	980	1,901	0,867	17,9	0,04844
T-20-08	Шумськ – Великі Дедеркали – /Р-32/	730	1,416	0,646	16,3	0,03963
T-20-09	Вишнівець – Ланівці	810	1,571	0,716	24,6	0,02911
T-20-10	Збараж – Підволочиськ	1170	2,270	1,035	40,1	0,02581
T-20-11	Копичинці – Гусятин	460	0,892	0,407	18,8	0,02165
T-20-12	Ланівці – Лисогірка – Теофіполь	1080	2,095	0,955	9,1	0,10495
T-20-13	Почаїв – Зборів	980	1,901	0,867	57,1	0,01518

Ділянка рівнинна, без вираженого нахилу поверхні, нерозчленована у рельєфі. На ділянці дороги 0-80 м – підйом, де швидкість не перевищує 40 км/год. На решті ділянці швидкість коливається в діапазоні 41-70 км через незадовільний стан дорожнього одягу.

Модель на основі рівняння 2.1 будується на прямокутній двовимірній (2D) області розміром 600 м по осі X та 1000 м по осі Y . Моделювання на локальному рівні, уможлиблює детальний аналіз поширення мікропластику безпосередньо над дорогою та прилеглою до неї зоною. Область розбита на сітку з 120 точками по X та 200 точками по Y , $dx = dy = 5$ м.



Рис. 3.10. Область з фрагментом дороги для моделювання

Джерело забруднення представлене як ламана лінія, що імітує ділянку дороги, з якої походить мікропластик. Ця ламана лінія проходить через три задані точки у координатній системі. Концентрація мікропластику на всіх точках цієї ламаної лінії підтримується на постійному рівні 14.0 мг/год, що відповідає сумарним викидам в околі точки сітки, що моделює постійні викиди мікропластику з однаковою інтенсивністю. Також враховано «ширину» дороги, з якої відбувається емісія, що дозволяє моделювати не просто математичну лінію, а певну смугу. Метерологічні умови та коефіцієнти дифузії, що визначаються класом стабільності атмосфери на вказану дату моделювання отримано з ГІС.

По аналогії з попередніми моделями задано початкові та граничні умови. Результати моделювання у вигляді поля концентрації мікропластику наведено на рис. 3.11.

Як видно, поле концентрації зміщене під дією північно-західного вітру. Використання такого підходу та модель уможлиблює побудову полів концентрації мікропластику, джерелом якого є стирання шин автомобілів за різні періоди, що дає змогу проводити оцінку та аналіз впливу об'єктів дорожньої інфраструктури на екосистему на локальних та регіональних рівнях.

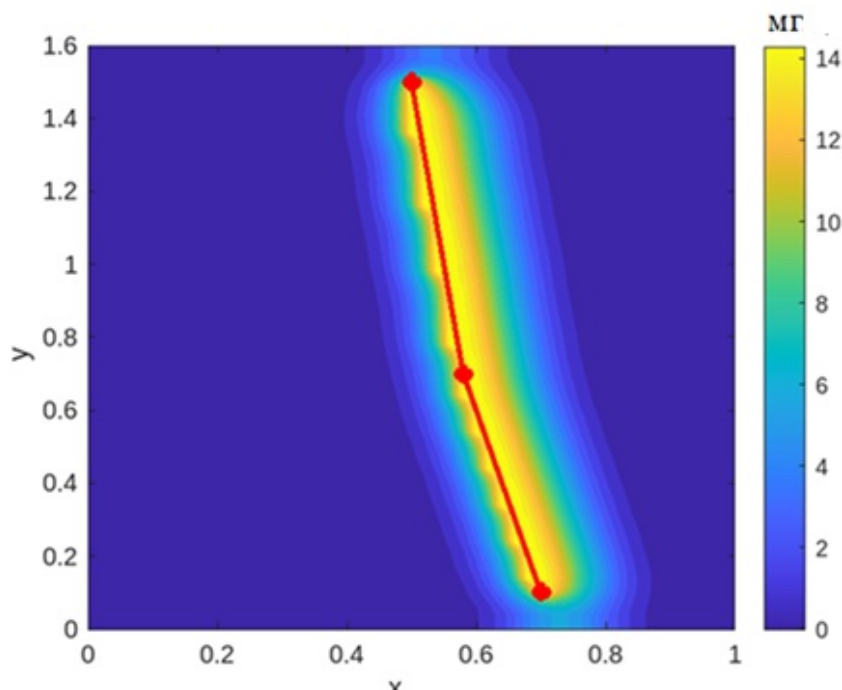


Рис. 3.11. Змодельоване поле добової концентрації мікропластику на придорожній території ділянки дороги

Висновки до розділу 3

1. Розроблено структури для формування вихідних даних для моделювання, з акцентом на застосуванні сучасних геоінформаційних систем. Детально описано способи збору, обробки та просторової прив'язки критично важливої інформації, включаючи дані про джерела забруднення, метеорологічні умови, рельєф та інші фактори. Особлива увага приділена інтеграції модельних результатів з функціоналом ГІС для їх картографічного відображення та просторового аналізу.

2. Розроблено комплекс моделей поширення мікропластику для визначених типів джерел. Зокрема: модель для точкових джерел, сміттєперероблювальних заводів), яка враховує викиди з окремих об'єктів та їх розповсюдження на прилеглі території; модель для поверхневих джерел (сміттєзвалищ), що враховує специфічні процеси фільтрації та вивітрювання, характерні для таких об'єктів; модель поширення мікропластику в придорожніх екосистемах, яка враховує утворення мікропластику внаслідок зносу автомобільних шин та його подальше поширення в умовах дорожнього руху.

3. Усі розроблені математичні моделі базуються на фундаментальному рівнянні адвекції-дифузії-реакції, що уможливорює врахування ключових фізичних процесів, які визначають поведінку мікропластику в приземному шарі атмосфери. Вони здатні прогнозувати просторово-часовий розподіл концентрації мікропластику залежно від характеристик джерела, метеорологічних умов, властивостей середовища та фізичних властивостей самих частинок мікропластику. Передбачається, що ці моделі будуть інтегровані в розроблене програмне забезпечення та функціонал геоінформаційних систем, що дозволить здійснювати ефективну візуалізацію та картографічний просторовий аналіз результатів моделювання поширення мікропластику.

РОЗДІЛ 4.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ

У четвертому розділі дисертаційної роботи розглянуто особливості побудови програмного забезпечення, призначеного для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери. Описано особливості побудови архітектури програмного забезпечення для математичного моделювання поширення мікропластику. Формалізовано вимоги та спроектовано основні компоненти системи.

Наведено загальну архітектуру із наголосом на інтеграцію математичного, програмного та апаратного забезпечення у єдину безшовну систему, доступну для кінцевого користувача. Деталізовано основні компоненти підсистеми математичного моделювання, а також засоби візуалізації результатів.

Подано опис технології створення портативної вимірювальної станції, що поєднує апаратний блок збору даних із спеціалізованим програмним забезпеченням для забезпечення її роботи.

Наведено діаграми та схеми, що ілюструють особливості програмної реалізації середовища для моделювання поширення мікропластику. Спроектовано підсистеми збереження даних із врахуванням особливостей представлення просторової даних.

Основні результати досліджень розділу опубліковано в [119, 120, 159]

4.1. Проектування системи

Розроблене програмне забезпечення для моделювання поширення мікропластику у приземному шарі атмосфери забезпечує повноту функціоналу для кінцевого користувача. Для побудови правильної та гнучкої архітектури спочатку було окреслено можливі варіанти використання системи

та послідовність виконання дій користувачем. Проектування системи за допомогою діаграми варіантів використання значно пришвидшує написання коду [2]. На рис. 4.1 представлено діаграму варіантів використання системи для моделювання поширення мікропластику. В системі виділено наступних акторів – користувач веб сервісу та оператор портативної вимірювальної станції.

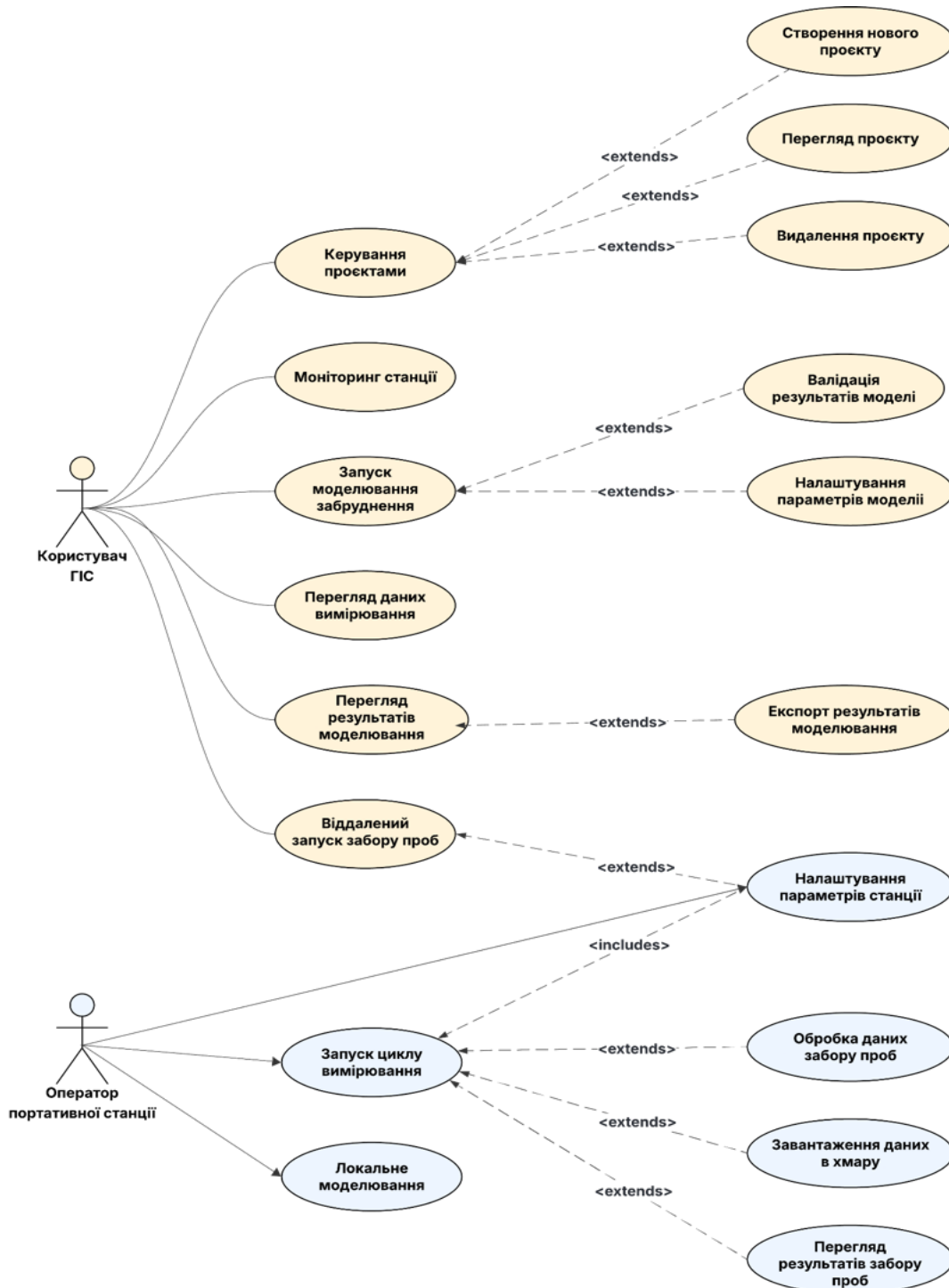


Рис. 4.1. Діаграма варіантів використання

Для користувач веб сервісу виділено наступні основні варіанти використання системи: управління проектами, перегляд даних вимірювань, запуск моделювання забруднення, перегляд результатів моделювання, запуск віддаленого відбору проб, моніторинг стану станції. В свою чергу для оператора портативної станції визначено наступні варіанти використання: запуск відбору проб, перегляд результатів, налаштування параметрів станції.

На рисунку 4.2 представлено діаграму послідовностей роботи системи, яка детально описує послідовність виконання подій та взаємодію між компонентами системи на користувачем.

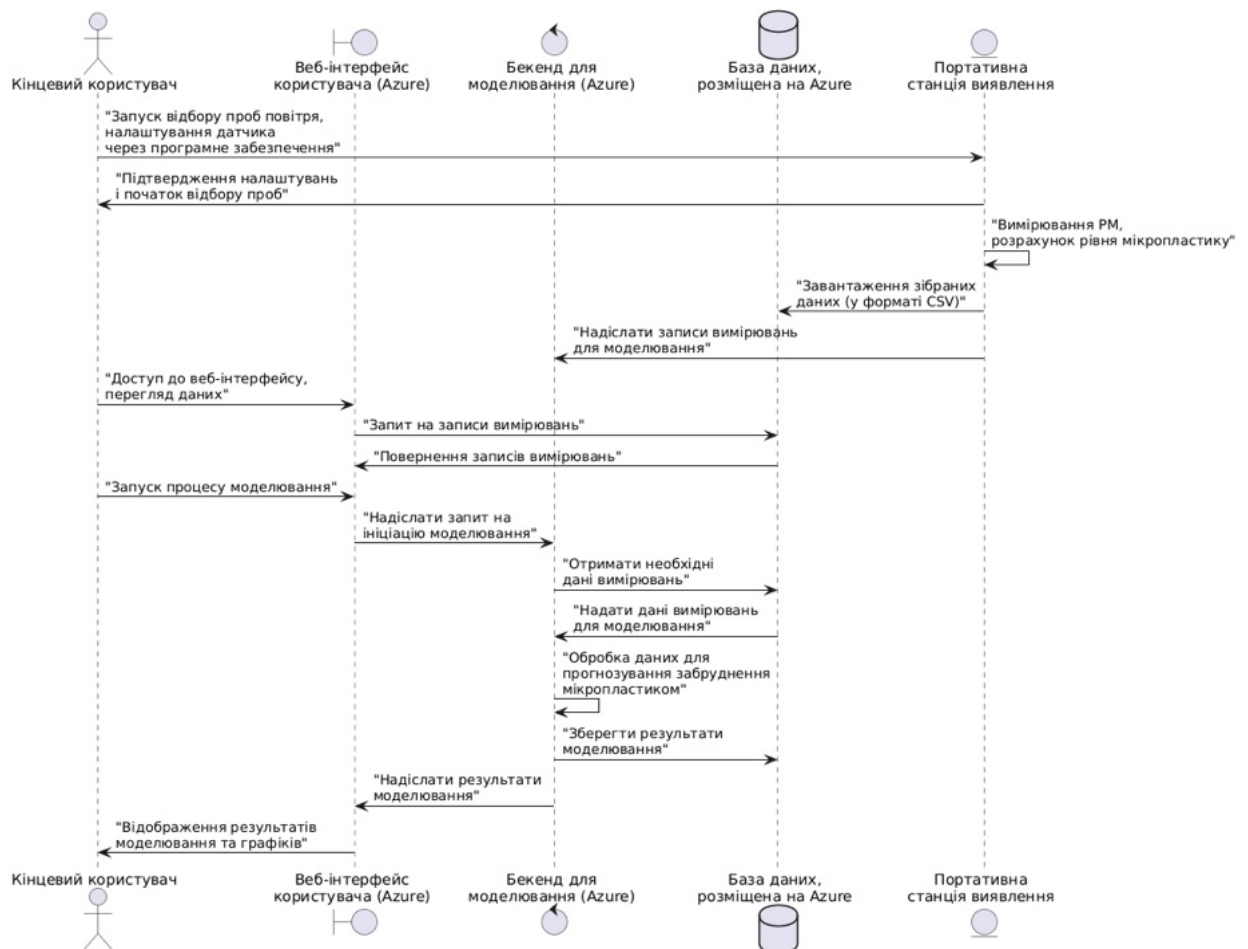


Рис. 4.2. Діаграма послідовностей роботи системи моделювання поширення мікропластику

У рамках розробки веб-системи для моделювання поширення мікропластику в атмосферному середовищі реалізовано структуру бази даних

на основі СУБД PostgreSQL із використанням розширення PostGIS, що дозволяє ефективно працювати із просторовими даними [12]. Запропонована модель даних є результатом формалізації предметної області, що враховує потреби збору вимірювань, конфігурації пристроїв, запуску моделей розрахунку, зберігання результатів та генерації звітів.

На рисунку 4.3 наведено основі таблиці схеми бази даних користувацького порталу системи моделювання поширення мікропластику.

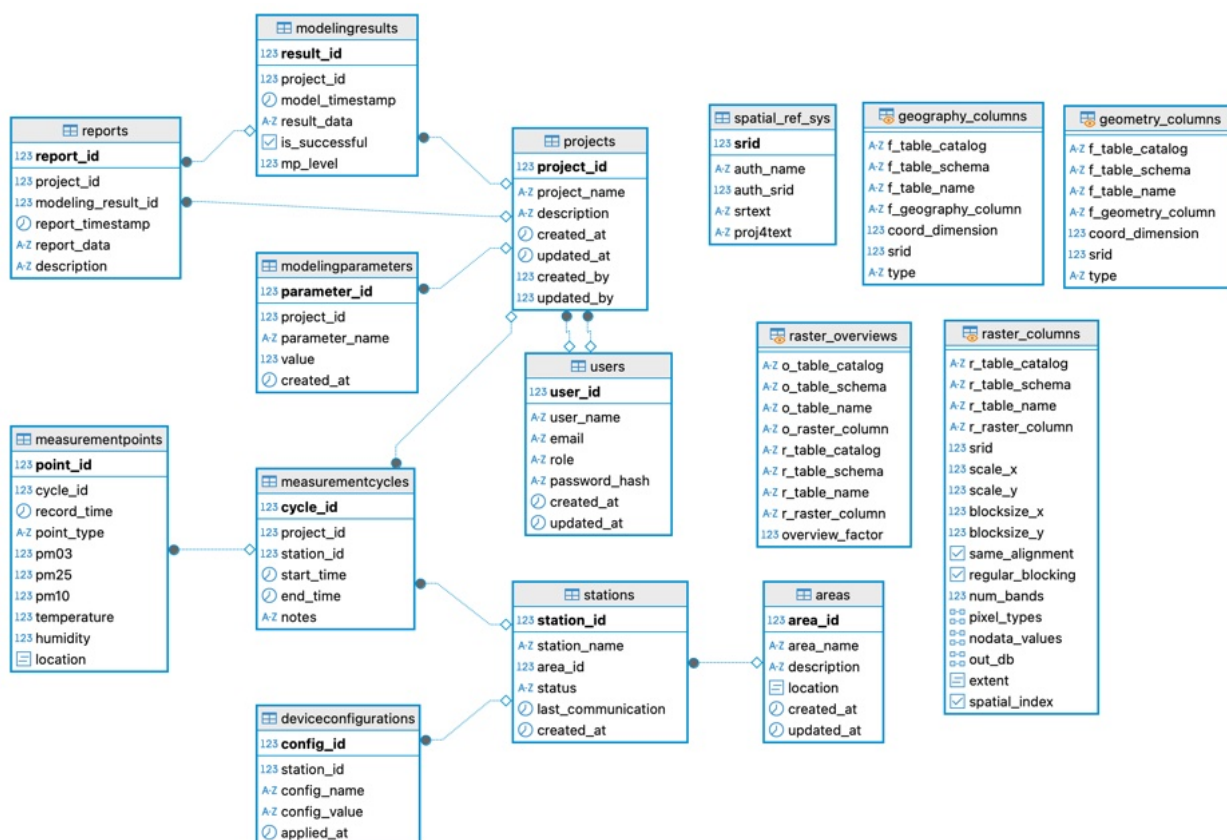


Рис. 4.3. ER-діаграма бази даних для системи моделювання поширення мікропластику у приземному шарі атмосфери

База даних побудована у відповідності до принципів нормалізації, містить сутності, що відповідають основним об'єктам системи, а також реалізує зв'язки між ними через зовнішні ключі. Просторові атрибути реалізовано за допомогою типу geography(POINT, 4326), що забезпечує можливість географічного аналізу та збереженню просторових даних. Окремо наведено службові таблиці розширення PostGIS.

Основні таблиці.

Projects – зберігає загальні метадані про проєкти, включаючи назву, опис, дати створення та оновлення, а також зовнішні ключі `created_by` та `updated_by`, які вказують на користувачів, відповідальних за відповідні дії.

Users – містить інформацію про користувачів системи: ім'я, електронну пошту, роль, хеш пароллю, а також часові мітки створення й оновлення облікового запису.

Areas – описує географічні ділянки дослідження. Містить геопросторову координату центру ділянки (`location`), що дозволяє здійснювати просторову прив'язку вимірювальних станцій.

Stations – зберігає дані про станції моніторингу, які закріплені за конкретними зонами (`area_id`). Для кожної станції фіксується її статус, час останньої комунікації та дата створення.

DeviceConfigurations – дозволяє відслідковувати налаштування сенсорного обладнання. Містить назву параметру, його значення, дату застосування, а також зв'язок зі станцією.

MeasurementCycles – описує цикли вимірювання, прив'язані як до станції, так і до проєкту. Для кожного циклу вказано часові межі та примітки.

MeasurementPoints – відображає окремі точки вимірювань у межах конкретного циклу. Включає в себе тип точки (референсна, контрольна тощо), значення концентрацій мікропластикових часток різних фракцій (PM0.3, PM2.5, PM10), температуру, вологість та координату вимірювання.

ModelingParameters – містить параметри, що використовуються для чисельного моделювання: коефіцієнти дифузії, швидкість вітру, параметри джерел, умови осадження тощо. Усі параметри асоційовано з конкретним проєктом.

ModelingResults – фіксує результати моделювання, включаючи дату моделювання, структуровані результати (`result_data`) та логічний прапор `is_successful`. Також містить атрибут `mp_level`, що характеризує рівень мікропластику за результатами моделі.

Reports – генерує звіти на основі результатів моделювання, які зберігають як дату створення, так і описовий матеріал. Звіт пов’язаний із проєктом і результатами моделювання через зовнішні ключі.

Структура бази даних реалізована таким чином, що забезпечує як логічну цілісність даних, так і можливість масштабування системи — зокрема, додавання нових типів сенсорів, розширення моделі оцінки забруднення, підключення зовнішніх аналітичних модулів. Застосування PostGIS дозволяє реалізовувати запити просторової близькості, аналіз геоданих та візуалізацію даних на інтерактивних мапах. Додатково GeoNode також послуговується засобами PostGIS та використовує окрему структуру даних для збереження шарів та інформації про них.

В додатку В наведено лістинг SQL/DDI коду для побудови структури відношень підсистеми зберігання даних для системи математичного моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери.

4.2 Архітектура системи моніторингу мікропластичних мас в повітрі

Запропоноване рішення для виявлення, моніторингу та моделювання мікропластику є комплексною системою, призначеною для збору даних у реальному часі, ефективної хмарної обробки даних та надання інформативної візуалізації. Архітектура має два основних сегменти: портативна станція виявлення, розгорнута для збору даних у полі, та компоненти, які відповідають за обробку, зберігання та аналіз даних, а також веб-портал для надання користувачам доступу до функціоналу моделювання та візуалізації.

У структурі системи реалізовано кілька ключових компонентів, що взаємодіють між собою через централізований сервер. Польові вимірювання виконуються за допомогою портативної станції, обладнаної сенсорами для визначення концентрації твердих часток у повітрі (PM0.3, PM1.0, PM2.5, PM10), температури, вологості та GPS-координат. Станція працює автономно,

здійснюючи збір і попередню обробку даних, які передаються через REST API до серверної частини.

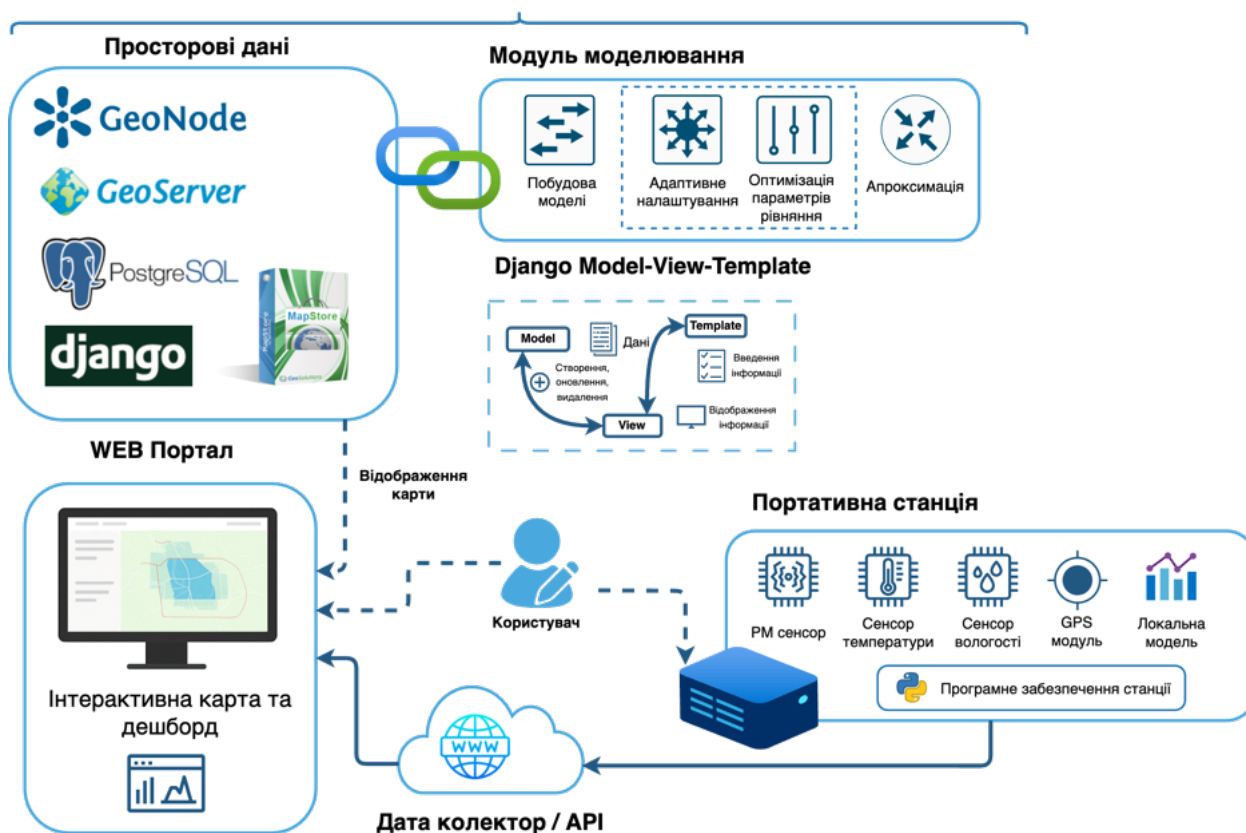


Рис. 4.4. Концептуальна архітектура системи моніторингу

У процесі проєктування системи постала задача вибору між використанням повноцінної геоінформаційної системи або ж застосуванням окремих бібліотек для візуалізації картографічних даних. З огляду на вимоги до підтримки стандартів просторових даних, інтеграції з джерелами екологічної інформації, а також ефективності розгортання, було проведено порівняльний аналіз зазначених підходів [14, 25, 43].

З наведеного порівняння видно, що використання повноцінної ГІС є доцільнішим у контексті завдання моделювання поширення мікропластику. Окрім економії часу на розробку базової інфраструктури, така система надає можливість отримання супутньої інформації (наприклад, температури повітря, вологості, швидкості вітру) безпосередньо через підключення до наявних

джерел відкритих даних. Це, своєю чергою, полегшує підготовку вхідних параметрів для розрахункової моделі та прискорює загальне впровадження рішення.

Таблиця 4.1

Порівняльний аналіз ГІС та бібліотек для відображення геоданих.

Критерій	ГІС система	Бібліотеки (Leaflet, Mapbox GL тощо)
Наявний функціонал	Забезпечує повний цикл роботи з геоданими: завантаження, візуалізація, керування метаданими та доступом	Обмежена базовою візуалізацією, решта функціоналу реалізується вручну
Відповідність стандартам OGC	Повна підтримка стандартів WMS, WFS, CSW	Відсутня
Додаткові можливості	Можливість підключення до кліматичних, гідрологічних, екологічних даних	Потребує окремої реалізації API та обробки даних
Адміністрування даних	Вбудовані засоби управління шарами, користувачами, дозволами	Відсутні, реалізуються окремо
Швидкість впровадження	Висока – завдяки готовим шаблонам і контейнерам Docker	Низька, оскільки потребує імплементації кожного елементу

У межах реалізації програмної системи для моделювання поширення мікропластику було обрано використання платформи GeoNode. Це рішення зумовлене низкою технічних та організаційних факторів. По-перше, GeoNode є системою з відкритим кодом, яка забезпечує повноцінний веб-інтерфейс для управління просторовими даними, включаючи підтримку стандартів OGC (WMS, WFS, CSW), засоби контролю доступу, ведення метаданих та інструменти для спільної роботи з геоінформацією. Це дає змогу швидко інтегрувати систему у загальну архітектуру проєкту без потреби у розробці власного серверного рішення з нуля. Порівняння характеристик ключових геоінформаційних систем (GeoNode, ArcGIS, QGIS, GRASS GIS) наведено в таблиці 4.2. Воно ґрунтується на результатах власного аналізу, а також на даних, отриманих із відкритих джерел [56, 17, 18, 29, 50, 71].

Таблиця 4.2

Порівняльна характеристика ключових ГІС-платформ

Критерій	GeoNode	ArcGIS	QGIS	GRASS GIS
Тип платформи	Веб-застосунок	Настільна та серверна	Настільна	Настільна
Тип ліцензування	Відкрите програмне забезпечення	Комерційна ліцензія	Відкрите програмне забезпечення	Відкрите програмне забезпечення
Цільове призначення	Публікація та спільне управління геоданими	Комплексні геоінформаційні рішення корпоративного рівня	Аналіз і редагування геоданих на локальній робочій станції	Просторове моделювання та чисельна обробка на локальній робочій станції
Підтримка стандартів OGC	Повна (WMS, WFS, CSW)	Повна	Повна	Часткова
Інтеграція у веб-середовище	Вбудована	Можлива через додаткові компоненти	Обмежена, потребує окремого налаштування	Відсутня

На відміну від ArcGIS, який є комерційним продуктом з високою вартістю ліцензування та залежністю від закритої екосистеми, GeoNode пропонує повну функціональність на базі open source технологій. Інші популярні інструменти з відкритим кодом такі як QGIS або GRASS GIS хоч і мають потужний функціонал для обробки геоданих, однак є настільними програмами та не надають готової серверної платформи з веб-інтерфейсом для багатокористувацької взаємодії та публікації геоданих у мережі. Таким чином, GeoNode найбільш відповідає вимогам до централізованого доступу, розширюваності, сумісності з іншими компонентами системи та ефективної взаємодії із зовнішніми сервісами.

Бекенд системи побудований на базі Django з використанням PostgreSQL/PostGIS для зберігання просторових та табличних даних. Математичний модуль забезпечує моделювання поширення мікропластиків на основі вхідних вимірювань, а результати моделювання інтегруються у вигляді векторних або растрових шарів у GeoNode/GeoServer для подальшої візуалізації. Використання GeoServer для роботи з геопросторовими даними

дозволяє застосовувати загальноприйняті протоколи передачі та репрезентації геопросторових даних таких як WMS, WFS, WCS, WPS та інші [12, 13]. Процес отримання вимірювань та оновлення картографічного шару повністю автоматизований.

Інтерфейс користувача представлено у вигляді веб-додатку з інтерактивною картою та аналітичним «дешбордом». Користувач має змогу переглядати історичні та поточні дані, запускати моделювання, створювати проєкти й здійснювати базову аналітику. Архітектура дозволяє масштабувати систему під різні сценарії дослідження – від точкових замірів до тривалого моніторингу. Розроблена архітектура відповідає принципам cloud-native. Cloud-native – це підхід до створення та управління додатками, що використовує контейнеризацію, мікросервіси та хмарні сервіси для забезпечення масштабованості, надійності та ефективного використання ресурсів [49].

Для реалізації автоматизованої системи моніторингу поширення мікропластику у повітрі було побудовано хмарну архітектуру з використанням інфраструктури Amazon Web Services (AWS). Такий підхід забезпечує необхідний рівень масштабованості, надійності, відмовостійкості та сумісності з сучасними інструментами просторового аналізу, включаючи засоби візуалізації результатів математичного моделювання [25]. На рисунку 4.6 наведено приклад реалізації архітектури системи із використанням Amazon Web Services.

Архітектура системи побудована за принципом логічної декомпозиції, де основні компоненти згруповані за функціональним призначенням: взаємодія з користувачем і пристроями, обчислювальні модулі, сховища даних, а також підсистеми безпеки й моніторингу [56]. Основним каналом доступу користувача до системи виступає інтерфейс веб-порталу, доменна адреса якого обслуговується за допомогою служби керування DNS-запитами Amazon Route 53. Для забезпечення швидкої та захищеної доставки веб-

контенту використовується мережа доставки контенту CloudFront, що дозволяє скоротити затримки та знизити навантаження на серверну частину.

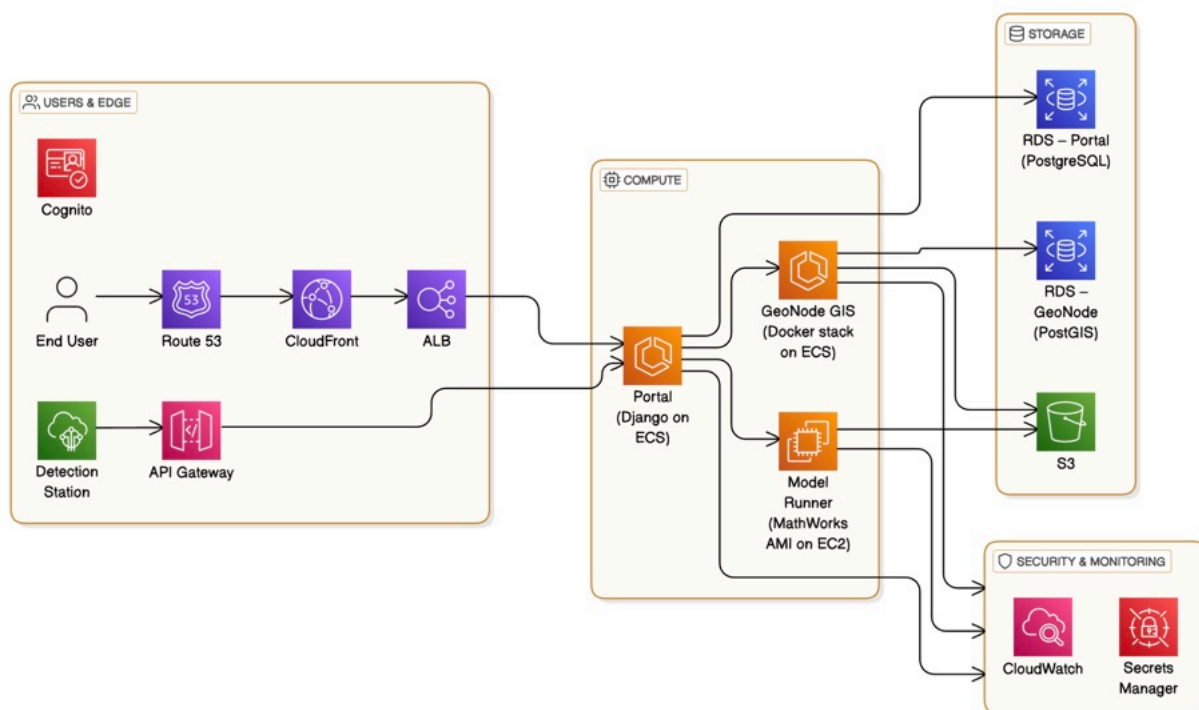


Рис. 4.6. Хмарна архітектура на прикладі AWS

Доступ до «бекенду» здійснюється через Application Load Balancer (ALB), який виконує функцію балансування вхідних запитів. Передача даних від портативних станцій моніторингу організована через шлюз API Gateway, що забезпечує стандартизований механізм інтеграції IoT-пристроїв з внутрішніми сервісами системи. Компонент автентифікації реалізовано на основі Amazon Cognito, що дає змогу централізовано керувати ідентифікацією користувачів, їхніми сесіями та правами доступу [17].

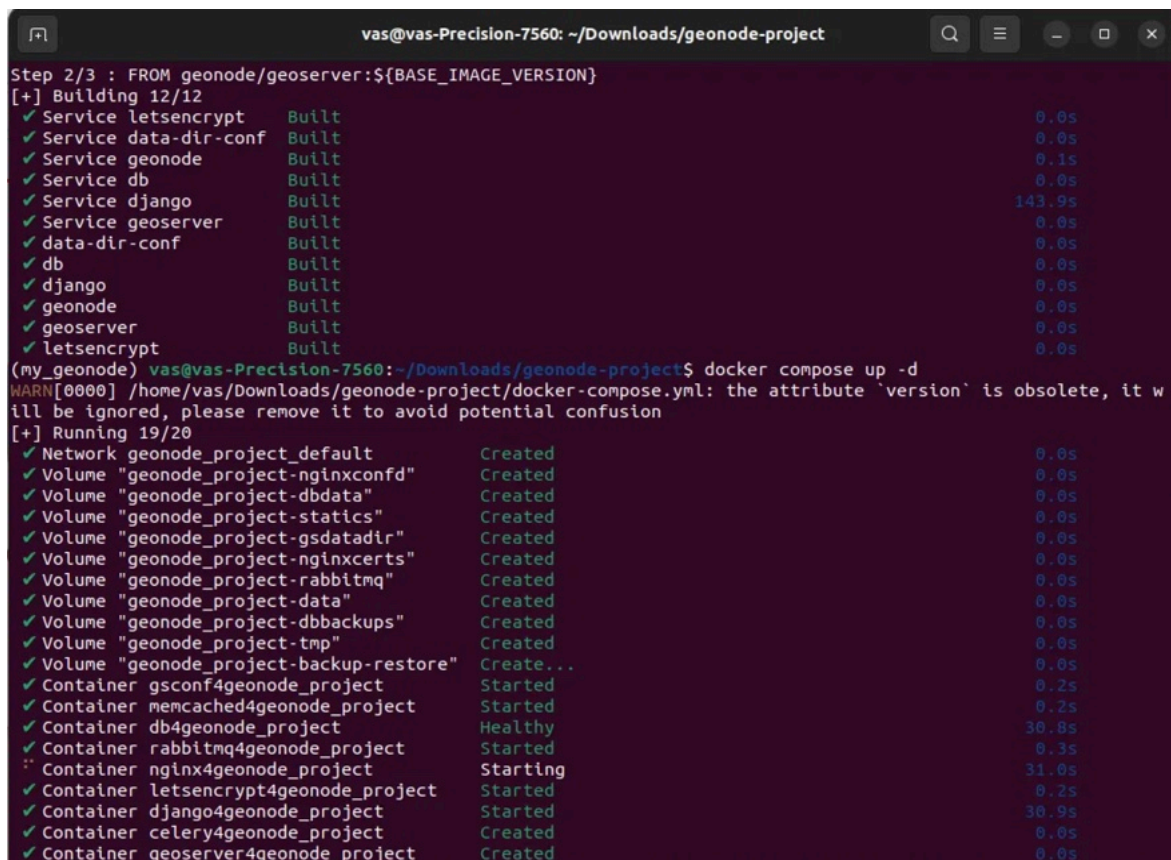
Обчислювальні функції розподілені між кількома спеціалізованими сервісами. Основний веб-портал системи реалізовано на основі фреймворку Django та розгорнуто у середовищі керованих контейнерів Amazon ECS, що спрощує розгортання та масштабування. Окремим контейнером, також запущеним в ECS, є модуль просторової візуалізації GeoNode, який забезпечує картографічне представлення вимірюваних та змодельованих даних.

Компонент обчислювального ядра, а саме модуль математичного моделювання поширення забруднення розгорнуто на віртуальній машині Amazon EC2 із використанням попередньо налаштованого образу MATLAB (MathWorks AMI). Це дозволяє уникнути проблем сумісності та скоротити час розгортання.

Підсистема зберігання даних представлена трьома ізольованими сховищами. Для потреб веб-порталу використовується реляційна база даних PostgreSQL, розгорнута у сервісі Amazon RDS. Окрема база з розширенням PostGIS використовується для GeoNode – це забезпечує підтримку просторових операцій без необхідності додаткових модулів. Для збереження результатів моделювання, зображень, шарів GeoTIFF та інших об'єктів використовується сервіс Amazon S3, який дозволяє ефективно працювати з неструктурованими даними та здійснювати контроль доступу до них. Інфраструктура також включає підсистеми безпеки та моніторингу. Зберігання конфіденційних налаштувань, паролів та ключів API організовано у сервісі AWS Secrets Manager, що забезпечує централізований контроль за доступом до чутливих даних. Для збору логів, побудови метрик і моніторингу продуктивності використовується AWS CloudWatch, що дозволяє виявляти аномалії у роботі компонентів та здійснювати базовий аудит подій.

Рішення щодо використання саме AWS обумовлене як технічними, так і організаційними чинниками. Сервіси цієї платформи мають високий рівень інтеграції між собою, підтримують автоматичне масштабування та мають сертифікати відповідності міжнародним стандартам безпеки. Крім того, наявність офіційної підтримки MATLAB на EC2 дозволяє без додаткових витрат забезпечити запуск наукових обчислень у відповідному середовищі [68]. В цілому обрана архітектура забезпечує необхідний рівень гнучкості, є сумісною з вимогами щодо обробки просторових даних, а також легко піддається масштабуванню на випадок зростання навантаження або розширення функціоналу системи.

Варто зазначити, що запропоноване програмне рішення не є жорстко прив'язаним до інфраструктури Amazon Web Services. Завдяки використанню відкритих стандартів, контейнеризованих сервісів, REST-інтерфейсів та сумісних СУБД, архітектура може бути розгорнута на будь-якій іншій хмарній платформі зі схожими можливостями. Зокрема, система може бути перенесена на Microsoft Azure, Google Cloud Platform, Oracle Cloud або IBM Cloud за умови адаптації окремих сервісів до відповідних аналогів [19]. Це забезпечує додаткову гнучкість і технологічну нейтральність рішення, що є важливим фактором у контексті його подальшої підтримки, масштабування або локального розгортання з урахуванням специфічних вимог проєкту. В залежності від навантаження та конкретних потреб ті чи інші елементи можуть бути додані або ж архітектура може бути спрощена для заощадження ресурсів. В контексті розробленого програмного засобу найбільш оптимальним способом розгортання системи є використання контейнеризації за допомогою Docker.



```

Step 2/3 : FROM geonode/geoserver:${BASE_IMAGE_VERSION}
[+] Building 12/12
✓ Service letsencrypt      Built      0.0s
✓ Service data-dir-conf    Built      0.0s
✓ Service geonode          Built      0.1s
✓ Service db               Built      0.0s
✓ Service django           Built      143.9s
✓ Service geoserver        Built      0.0s
✓ data-dir-conf            Built      0.0s
✓ db                      Built      0.0s
✓ django                  Built      0.0s
✓ geonode                  Built      0.0s
✓ geoserver                Built      0.0s
✓ letsencrypt              Built      0.0s
(my_geonode) vas@vas-Precision-7560:~/Downloads/geonode-project$ docker compose up -d
WARN[0000] /home/vas/Downloads/geonode-project/docker-compose.yml: the attribute `version` is obsolete, it will be ignored, please remove it to avoid potential confusion
[+] Running 19/20
✓ Network geonode_project_default      Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-nginxconfd"  Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-dbdata"       Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-statics"      Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-gsdatadir"    Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-nginxcerts"   Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-rabbitmq"     Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-data"         Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-dbbackups"    Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-tnp"          Created      0.0s
✓ Volume "geonode_project-backup-restore" Create...    0.0s
✓ Container gsconf4geonode_project      Started      0.2s
✓ Container memcached4geonode_project   Started      0.2s
✓ Container db4geonode_project           Healthy      30.8s
✓ Container rabbitmq4geonode_project     Started      0.3s
✓ Container nginx4geonode_project        Starting     31.0s
✓ Container letsencrypt4geonode_project Started      0.2s
✓ Container django4geonode_project       Started      30.9s
✓ Container celery4geonode_project       Created      0.0s
✓ Container geoserver4geonode_project    Created      0.0s

```

Рис. 4.7. Запуск платформи із використанням Docker контейнерів

Налаштування індивідуальних компонентів та інтеграцій між ними потребує значної кількості попередніх налаштувань та конкретного системного середовища і залежностей. Тому у випадку розгортання системи на основі AWS змістовним є використання Amazon EKS (Elastic Kubernetes Service).

4.3 Програмно-апаратне забезпечення для польових вимірювань мікропластику у повітрі

Для забору матеріалу та вимірювання рівня завислих речовин у повітрі було розроблено портативну станцію виявлення. Ця станція є мобільним модулем для збору даних, які надалі обробляються та використовуються у математичній моделі для прогнозування поширення мікропластичних мас. Станція побудована на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3 B+ як центрального контролера та обладнана апаратними компонентами для виконання замірів стану навколишнього середовища, геопозиціонування та управління станцією:

- лазерний датчик частинок Nova SDS011 для виявлення твердих завислих частинок;
- датчик температури та вологості DHT11;
- модуль GPS G-Mouse VK-162 для запису географічних координат кожної точки даних;
- резистивний дисплей Elecrow XPT2046, із контролером ILI9486 для управління станцією та виводом інформації.

Для підключення сенсорів та додаткового обладнання використовуються наявні інтерфейси Raspberry Pi (рисунк 4.8).

Ключовим елементом системи є датчик Nova SDS01. Це професійний сенсор для вимірювання концентрації пилу в повітрі, який використовує лазерну технологію.

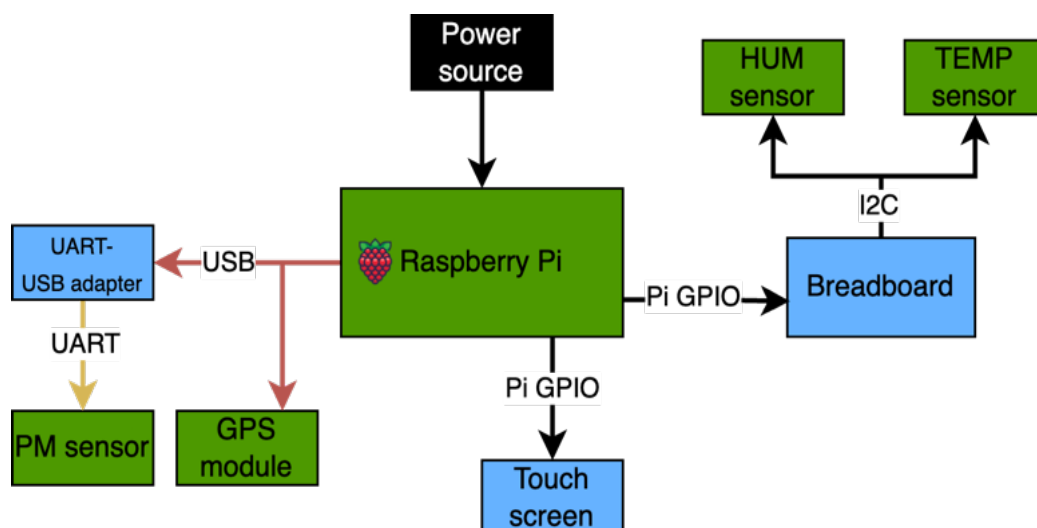


Рис. 4.8. Схема підключення апаратного забезпечення портативної станції

Час реакції складає менше 10 секунд, що дозволяє швидко реагувати на зміни в навколишньому середовищі. Значення передаються кожну секунду в стандартному режимі роботи [20]. Інтеграція елементів та прилад кінцевий зображено на рисунку 4.9.



Рис. 4.9. Апаратне забезпечення портативної станції

Для створення корпусу було використано 3D друк. Спочатку проведено заміри усіх компонентів, що мають бути сховані всередині корпусу, а далі розроблено 3D модель із використанням програмного забезпечення “FreeCAD”. Кінцевий вигляд станції з інтегрованими у неї елементами та програмним забезпеченням зображено на рисунку 4.10.

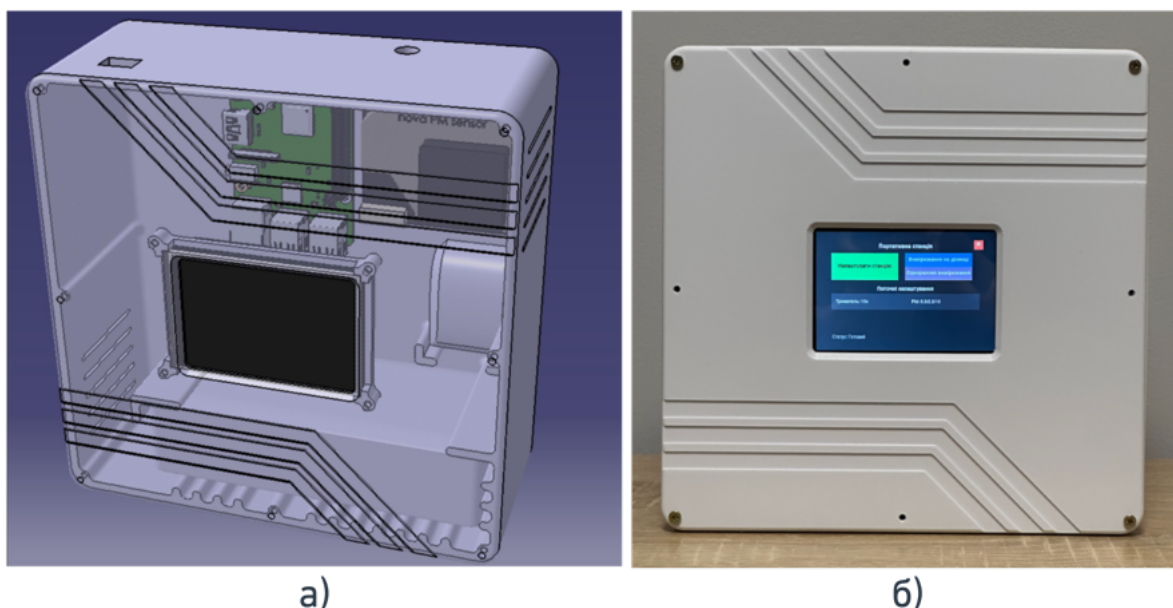


Рис. 4.10. Портативна станція: а) 3D модель корпусу портативної станції, б) станція у зібраному вигляді

Raspberry Pi виконує роль оркестратора, керуючи зчитуванням датчиків, здійснюючи попередню перевірку даних і забезпечуючи зв'язок із хмарною інфраструктурою. Станція живиться від павербанку потужністю 20 Вт, що робить її повністю портативною та легко розгортуюною в різних місцях для збору різноманітних наборів даних. У таблиці 4.3 подано орієнтовну ціну компонентів портативної станції.

Побудована портативна станція для моніторингу якості повітря демонструє суттєві переваги порівняно з комерційними аналогами. Її орієнтовна вартість становить близько 7400 грн, що є в 4–9 разів дешевше за типові ринкові рішення, зокрема PCE-RCM 16 (~32 000 грн), Korno GT-1000-JM3 (~56 000 грн) та SEM DT-9881 (~64 000 грн). Окрім фінансової

доступності, розроблена станція вирізняється високою гнучкістю: вона підтримує оновлення програмного забезпечення, може адаптуватися до специфічних задач і доповнюватися новими модулями. На відміну від згаданих комерційних пристроїв, які потребують підключення до ПК через кабель для отримання результатів, запропоноване рішення забезпечує автоматичну передачу даних у хмару в режимі реального часу, що значно розширює її функціональні можливості та зручність у використанні.

Таблиця 4.3

Орієнтовна вартість апаратного забезпечення для портативної станції
вимірювання завислих частинок

№	Компонент	Орієнтовна ціна, грн
1	Лазерний датчик твердих частинок Nova SDS011	1500
2	Датчик температури та відносної вологості DHT11	300
3	GPS-модуль G-Mouse VK-162	900
4	Сенсорний резистивний дисплей 3.5" (XPT2046 + ILI9486)	700
5	Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3 Model B+	2800
6	Елементи живлення (павербанк або блок живлення)	800
7	Захисний корпус	400
	Разом	7400

Програмне забезпечення станції реалізоване на мові програмування Python із використанням набору бібліотек для управління периферійними пристроями, що використовуються для збору даних. Ці програмні компоненти включають модулі для збору даних, модуль розрахунку мікропластику, який застосовує формули для оцінки рівнів мікропластику в реальному часі, компонент геофенсінгу для моніторингу географічних меж збору даних та інтерфейс користувача, представлений через сенсорний дисплей, що надає локальний огляд поточного збору та обробки даних. Фрагмент лістингу програмного коду, зокрема модуля збору показань датчика завислих частинок подано на рисунку 4.11. Для покращення точності вимірювання завислих частинок виконується програмне адаптивного налаштування параметрів

показників на основі логарифмічної залежності між співвідношенням PM2.5/PM10 [41].



```

1 usage
5 class SDS011:
6     def __init__(self, port='/dev/ttyUSB0', baudrate=9600, timeout=2):
7         """Ініціалізація SDS011"""
8         self.ser = serial.Serial(port, baudrate=baudrate, timeout=timeout)
9
10    1 usage
11    def read_frame(self):
12        while True:
13            start_byte = self.ser.read(size=1)
14            if start_byte == b'\xaa':
15                frame = self.ser.read(size=9)
16                if frame[0] == 0x00:
17                    return start_byte + frame
18
19    1 usage
20    def parse_frame(self, frame):
21        """Парсинг фреймів значень PM2.5 та PM10 в мкг/м³."""
22        data = struct.unpack(_format: '<HHxxBB', frame[2:])
23        pm25 = data[0] / 10.0
24        pm10 = data[1] / 10.0
25        return pm25, pm10
26
27  1
28  import numpy as np
29  import pandas as pd
30  import matplotlib.pyplot as plt
31
32  1 usage
33  def calibrate_pm25(pm25_sds, pm10_sds):
34      """ Розрахунок співвідношення PM10/PM2.5 """
35      ratio_pm10_pm25 = pm10_sds / pm25_sds if pm25_sds > 0 else 1.0
36
37      """ Функція логарифмічного калібрування """
38      calibration_factor = -0.509 * np.log(ratio_pm10_pm25) + 1.2203
39
40      """ Застосування калібрування для значення PM2.5 """
41      pm25_calibrated = pm25_sds / calibration_factor if (calibration_factor >
42                                                             0) else pm25_sds
43
44      return pm25_calibrated

```

Рис. 4.11. Фрагмент лістингу програмного коду модуля калібрування сенсора для вимірювання завислих речовин

Програмне калібрування дозволяє покращити точність визначення кількості завислих речовин за умови використання бюджетних оптико-лазерних сенсорів.

Діаграма класів програмного забезпечення портативної станції зображена на рисунку 4.12.

Основний контролер, реалізований класом StationController, координує роботу всієї системи, ініціалізуючи компоненти та здійснюючи циклічний збір, обробку та передачу даних, що отримуються з різноманітних сенсорів.

Збір даних організовано через клас SensorManager, який агрегує показники з індивідуальних сенсорів – SDS011Sensor та DHT11Sensor, що вимірює температуру та вологість і клас GPSSensor, який надає функціонал геопозиціонування.

Отримані дані передаються до класу MicroplasticCalculator, що на основі математичної моделі з використанням налаштованого коефіцієнта здійснює

оцінку рівня мікропластичних частинок, інтегруючи результати вимірювань з сенсорів. Такий підхід дозволяє отримати швидкий розрахунок із врахуванням умов навколишнього середовища у точці проведення замірів.

Для перевірки достовірності просторових даних використовується GeofenceManager, що контролює, чи знаходяться координати в межах встановленої геозони.

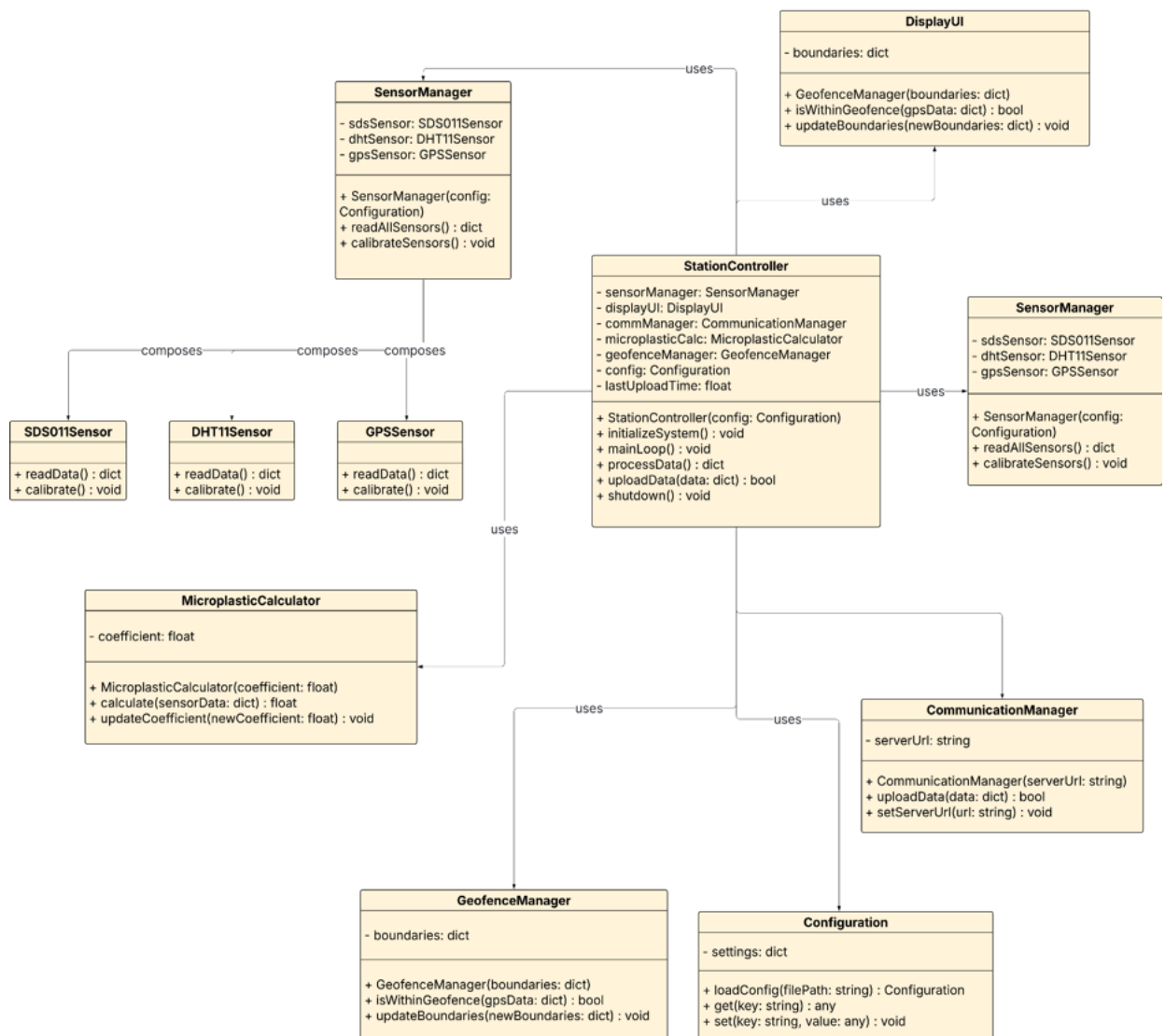


Рис. 4.12. Діаграма класів портативної станції

Клас DisplayUI реалізує графічний інтерфейс для локального відображення інформації. Використовуючи бібліотеку Tkinter клас відповідає

за вивід поточних даних, відображення повідомлень, індикацію стану системи та взаємодію користувача із системою.

Для передачі даних на сервер передбачено клас `CommunicationManager` – у ньому реалізовано методи передачі даних через HTTP протокол із використанням REST API.

Службовий клас `Configuration` забезпечує централізоване управління параметрами системи (налаштування портів, інтервали оновлення, параметри геозони та коефіцієнт розрахунку). Він забезпечує доступ до параметрів як для ініціалізації компонентів, так і для динамічного оновлення конфігурації. Параметри можуть бути задані оператором станції або ж оновлені видалено із використанням функціоналу класу `CommunicationManager`.

На рисунку 4.13 представлено діаграму послідовності дій та можливі розгалуження під час роботи з портативною станцією для отримання інформації про наявність мікропластику в атмосфері.

Головне вікно, завантажується одразу при запуску портативної станції. Надає користувачеві можливість перейти до налаштувань або ж перейти у розділи виконання замірів.

Екран налаштування станції дозволяє включити програмне адаптивного налаштування параметрів для сенсору завислих частинок на основі логарифмічної залежності між співвідношенням кількості різних розмірів завислих частинок. Також надає можливість провести функціональне тестування периферії станції, впевнившись у працездатності сенсорів.

Також користувачеві доступний екран налаштування проекту. Користувач може вказати ідентифікатор існуючого проекту або ж створити новий проект та задати налаштування. Створений проект буде автоматично передано на сервер, також він стане видимим у списку проектів.

Після внесення даних про проект користувача буде перенаправлено на екран здійснення забору проб. Тут користувач може ініціювати різні типи вимірювання, що відповідатимуть характеристикам джерела забруднення. Під час проведення замірів користувач може позначити точку як джерело або ж як

контрольну. Процес забору проби супроводжується візуальним індикатором у вигляді лінії прогресу. Час «семплінгу» залежить від раніше внесених налаштувань (рекомендовано 10 секунд згідно документації сенсора SDS011). Кількість замірів необмежена, користувач може виконувати заміри доки не завершить обхід запланованого периметру, джерел забруднення в його межах та визначених контрольних точок.

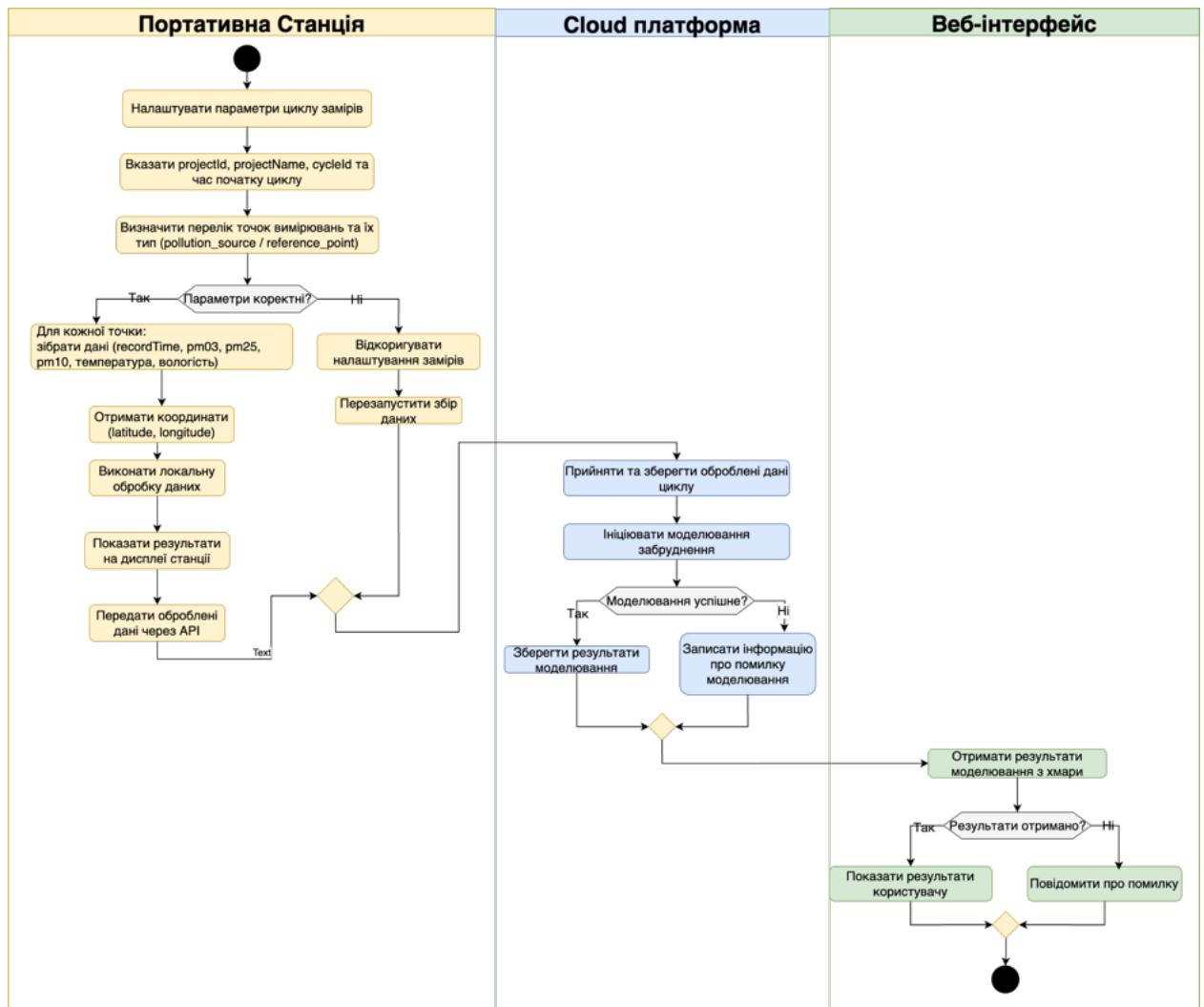


Рис. 4.13. Діаграма активності: використання портативної станції

Після завершення циклу вимірювання користувач має змогу ознайомитися з отриманими результатами безпосередньо на інтерфейсі пристрою або в пов'язаному веб-застосунку. Дані можуть бути передані на сервер для подальшої обробки сервісом математичного моделювання, що

дозволяє здійснити інтерпретацію результатів, згенерувати прогноз поширення забруднення та візуалізувати інформацію у вигляді тематичних шарів на карті. У разі необхідності використання станції в автономному режимі або для проведення одноразового вимірювання без географічної прив'язки до проєкту, передбачено можливість фіксації окремого заміру з наступною передачею результатів. Основні екрани інтерфейсу користувача, що ілюструють функціональні можливості системи, наведено на рисунку 4.14.

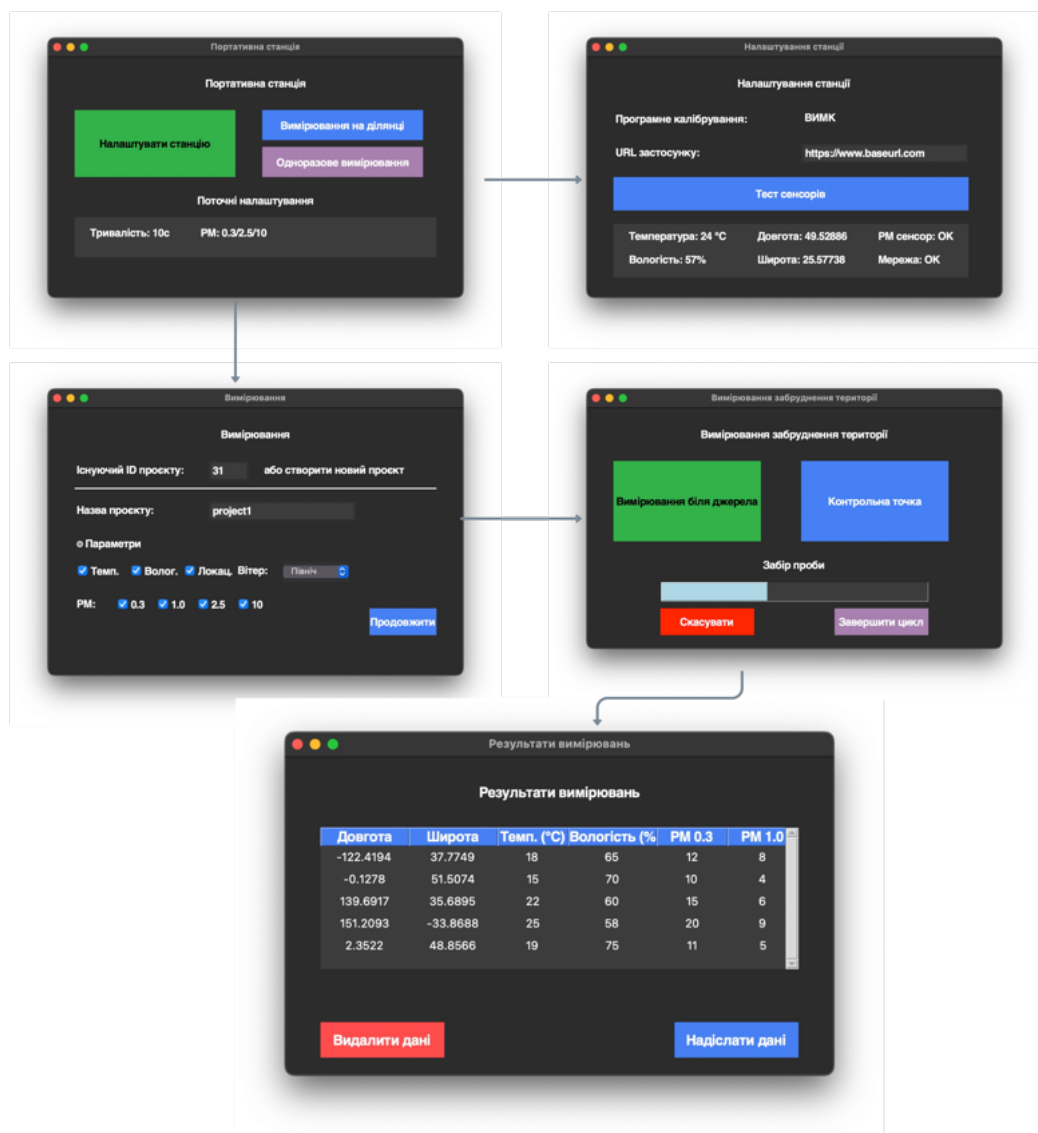


Рис. 4.14. Діаграма активності: використання портативної станції

4.4 Реалізація системи для моделювання поширення мікропластику

Веб-система побудовано на основі фреймворку Django – сучасного фреймворку для створення веб-застосунків на Python. Django забезпечує структурований підхід до побудови веб-систем, надаючи вбудовані засоби для роботи з базами даних, маршрутизації запитів, обробки форм та створення адміністративного інтерфейсу. Цей фреймворк реалізує шаблон проєктування MVT (Model-View-Template), що спрощує розділення логіки, вигляду та даних застосунку [22]. Django також робить акцент на повторне використання компонентів, що прискорює розробку та підвищує якість коду. Загальна архітектура проєкту із використанням Django наведена на рисунку 4.15.

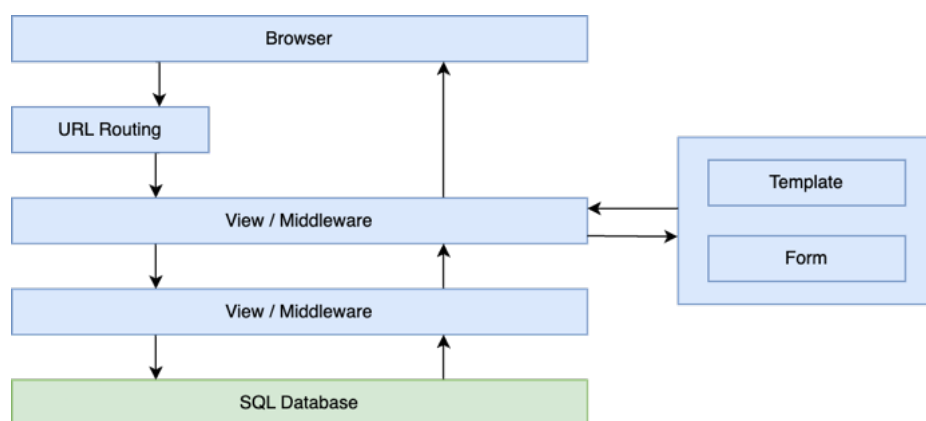


Рис. 4.15. Узагальнена архітектура фреймворку Django

Геоінформаційна система GeoNode також використовує елементи фреймворку Django, що дозволяє нативно інтегрувати наявний функціонал ГІС у розроблену веб-систему моделювання поширення мікропластику. Взаємодія між портативною станцією виявлення та серверною частиною здійснюється за допомогою GSM мережі. Дані передаються через REST API, що забезпечує передачу даних через HTTPs протокол. API портативної станції містить набір інтерфейсів, основними з яких є:

- /collectSensorData (POST) – керування сенсорами стації;

- /processData (POST) – локальна обробка даних;
- /uploadProcessedData (POST) – завантаження даних в хмару.

Кожен інтерфейс приймає набір параметрів для авторизації та ініціалізації відповідного функціоналу станції або бек-енд системи. Наприклад передача даних отриманих під час циклу вимірювання передається методом POST через інтерфейс uploadProcessedData і повинен містити наступні параметри всередині базового JSON об'єкта measurementCycle:

- projectId (string) – унікальний ідентифікатор проекту у випадку, якщо користувач портативної станції хоче використати існуючий проект;
- projectName (string) – назва проекту;
- cycleId (string) – унікальний ідентифікатор циклу замірів;
- startTime (string) – час початку циклу замірів у форматі ISO 8601;
- endTime (string) – час завершення циклу замірів у форматі ISO 8601;
- points (array) – масив об'єктів, де кожен об'єкт описує дані вимірювання для однієї точки. Кожен об'єкт (точка) містить в собі дані:
 - pointType (string) – визначає тип точки, що вимірюється, наприклад, pollution_source для точок із джерелом забруднення або reference_point для контрольних точок;
 - sensorData (object) – об'єкт, що містить дані заміру конкретної точки.
- Всередині нього мають бути наступні поля:
 - recordTime (string) – час виконання замірів у форматі ISO;
 - pm03 (float) – виміряне значення PM0.3 у мікрограмах на кубічний метр ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
 - pm25 (float) – виміряне значення PM2.5 у мікрограмах на кубічний метр ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
 - pm10 (float) – виміряне значення PM10 у $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
 - temperature (float) – температура повітря;
 - humidity (integer) – відносна вологість у відсотках;

- location (object) – об’єкт із координатами, який містить:
 - latitude (float) – широта;
 - longitude (float) – довгота.

Інтерфейс станції підтримує додатковий функціонал як от віддалена конфігурація, керування живлення станції, отримання інформації про напрямки вітру та інші службові методи. Коротко охарактеризуємо основні класи, що реалізують веб-систему та систему моделювання (рис. 4.16).

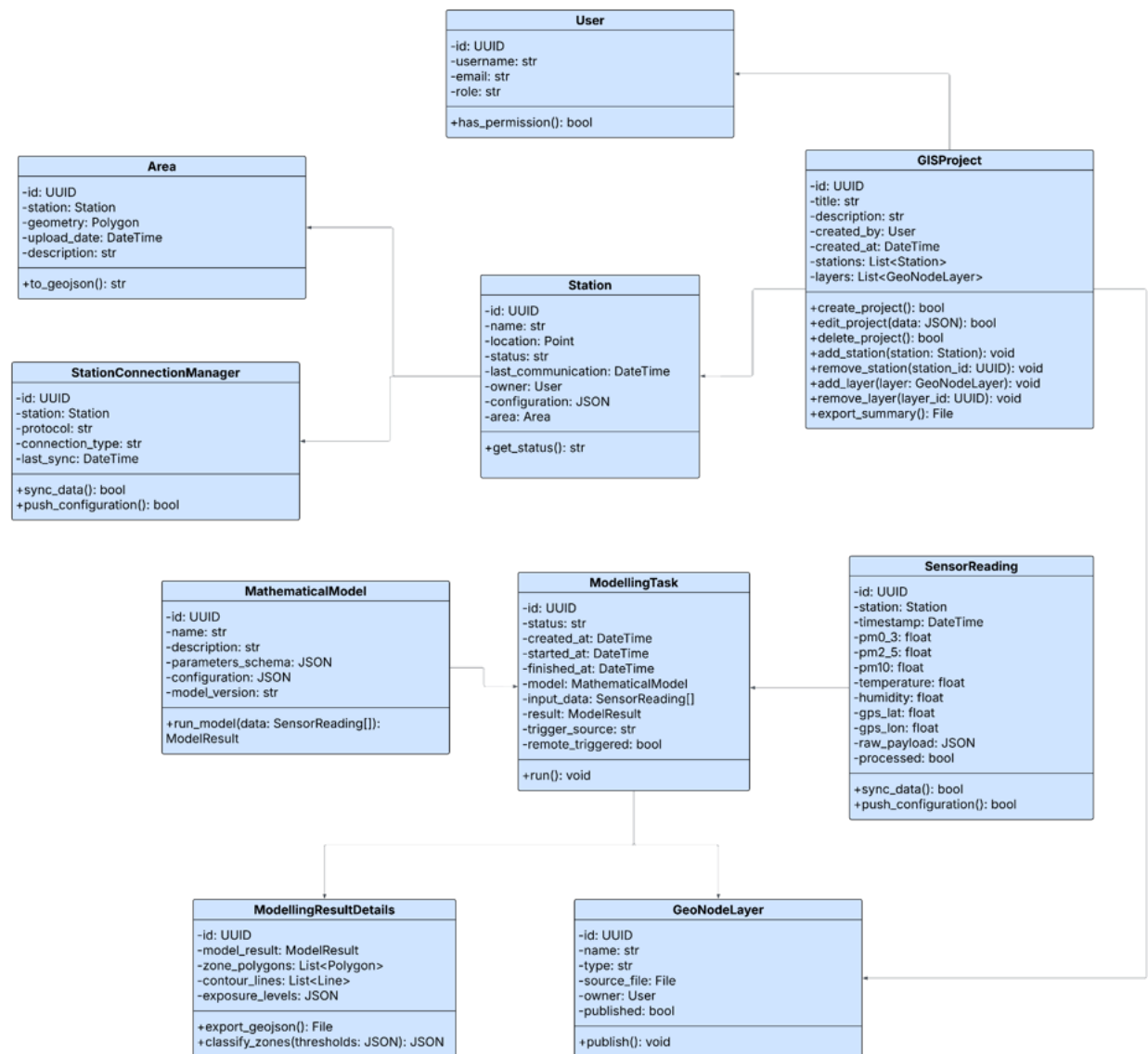


Рис. 4.16. Діаграма основних класів системи моделювання поширення мікропластику

Клас `Station` – це модель портативної станції, яка встановлюється в польових умовах і відповідає за вимірювання рівнів забруднення. Вона містить інформацію про своє розташування, технічну конфігурацію, поточний стан зв'язку, дату останньої передачі даних, а також дані про користувача, який її обслуговує. До станції може бути прив'язана певна територія спостереження. Завдяки методу `get_status()` можна швидко перевірити її активність у системі.

Клас `StationConnectionManager` відповідає за технічну взаємодію станції з центральною системою. Через нього здійснюється обмін даними, оновлення конфігурацій, а також контроль часу останнього з'єднання. Він зберігає інформацію про тип і використовуваний протокол обміну. Наразі система використовує GSM модем, проте використання одноплатного ПК для бази портативної станції дозволяє розширити систему у майбутньому.

Модель `SensorReading` зберігає результати кожного вимірювання: концентрації твердих часток (PM0.3, PM2.5, PM10), температуру, вологість, географічні координати, а також необроблені дані у форматі JSON. Крім того фіксується чи були ці дані попередньо оброблені. Метод `preprocess()` дозволяє виконати первинну фільтрацію або адаптивного налаштування параметрів, а `to_geojson()` підготувати дані до відображення на карті. Для цього дані переформатовуються у формат GeoJSON. Надалі дані можуть бути перетворені у різні формати для відображення на мапі, наприклад `shapefile`, `GeoTIFF`, `XML` тощо.

Клас `User` описує обліковий запис користувача системи. Він містить базову інформацію про користувача та його роль, що визначає рівень доступу. Метод `has_permission()` використовується для перевірки прав доступу.

`MathematicalModel` – це представлення математичної моделі, яка використовується для прогнозування поширення забруднення. У класі зберігаються параметри моделі, її опис і версія. Основна функція `run_model()` приймає вхідні дані і формує прогноз поширення мікропластичних мас.

`ModelResult` фіксує результат виконання математичної моделі. Він містить дату запуску, файл із результатами (наприклад, растрову карту,

GeoJSON тощо), а також зведені числові дані. Метод `generate_heatmap()` дозволяє побудувати візуальне відображення прогнозу у вигляді теплової карти.

`ModellingResultDetails` – це розширений опис результатів моделювання. Тут зберігаються просторові полігони зон забруднення, ізолінії концентрацій та інформація про рівні впливу. Цей клас дозволяє експортувати результати в GeoJSON або класифікувати зони відповідно до заданих порогів. Він є основою для створення шарів у ГІС та подальшого їх відображення.

`ModellingTask` фіксує кожен запуск моделі: дату створення, статус, джерело запуску (наприклад, вручну чи віддалено), набір вхідних даних, використану модель та результат. Метод `run()` забезпечує ініціацію обчислювального процесу.

`GeoNodeLayer` – це клас для роботи із картами з GeoNode, що відображаються на сторінці. Клас також зберігає інформацію про шари, доступні на кожній із карт. Кожен шар має тип (векторний або растровий), файл-джерело та статус. Через метод `publish()` шар стає доступним для візуалізації в ГІС-інтерфейсі.

Клас `Area` описує просторову зону, покрити під час виконання циклу замірів оператором портативної станції. Геометрія зберігається у вигляді полігону й може бути експортована у форматі GeoJSON.

`GISProject` є логічним контейнером для роботи з даними в рамках окремого дослідження або етапу моніторингу. Він поєднує станції, шари, результати моделювання і надає функції для створення, редагування, архівації та експорту звітів. Завдяки методам `add_station()`, `add_layer()` користувач може оперативно керувати даними пов'язаними з конкретним проєктом.

Після отримання даних циклу вимірювання, система додатково обробляє отримані дані та передає їх у вигляді точок відображаючи на карті Geonode як окремий шар (існуючий або новий).

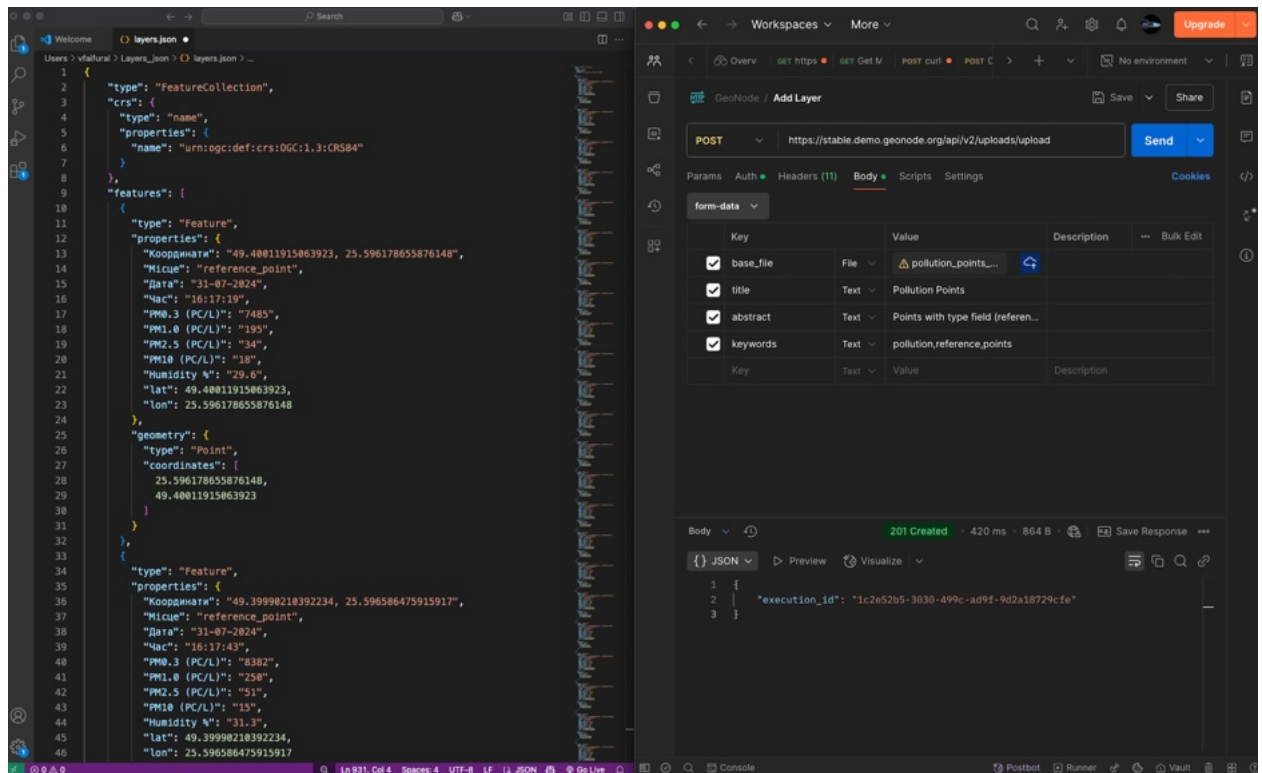


Рис. 4.17. API інтерфейс для передачі даних вимірювань між станцією та сервером

Разом із геопросторовими координатами кожної точки вимірювання до системи також передаються супровідні метадані, що містять інформацію про концентрацію зважених часток (РМ), час фіксації результату, температуру повітря та рівень вологості. На рисунку 4.18 наведено результати циклу замірів. Контрольні вимірювання (reference points), які використовуються для перевірки точності та стабільності результатів, позначено блакитним кольором. Натомість точки, що були зафіксовані поблизу потенційних джерел забруднення, виділено червоним кольором. Після завершення передачі даних до системи, користувач має можливість здійснити додаткову верифікацію – змінити тип точок, скоригувати значення параметрів або видалити надлишкові записи, що могли виникнути внаслідок похибок, неправильного порядку або технічних збоїв під час вимірювання.

Для користувача веб-системи доступна сторінка авторизації, механізм якої реалізовано засобами фреймворку Django. З метою спрощення процесу налагодження на етапі розробки застосовувалася базова HTTP-аутентифікація.

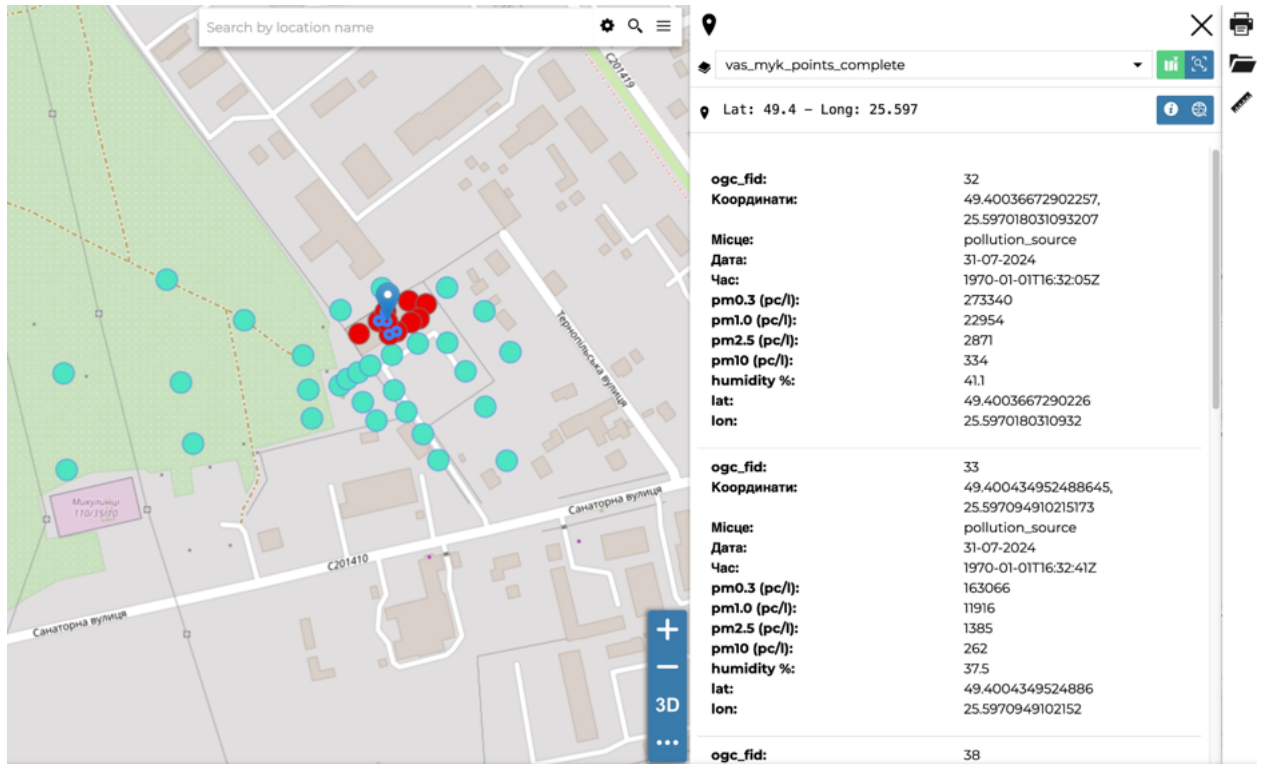


Рис. 4.18. Відображення результатів циклу вимірювання із замірами біля джерела забруднення та контрольні точки

Для управління портативними станціями в системі передбачено окрему сторінку налаштувань, яка надає користувачеві можливість переглядати вже асоційовані станції, а також додавати нові. У лівій частині інтерфейсу розміщена форма для реєстрації нової станції, що передбачає введення унікального ідентифікатора пристрою, призначення відповідального оператора та завантаження фотографії (рисунок 4.19). Це забезпечує не лише структуроване збереження даних про обладнання, але й візуальну ідентифікацію станцій під час подальшої роботи з проєктами.

У правій частині сторінки налаштувань відображається перелік асоційованих портативних пристроїв із відповідними деталями. Для кожної станції надається інформація про її мережевий статус (активна/неактивна), автоматично згенерований URL ідентифікатор для підключення, а також дата

та час останнього успішного з'єднання із сервером. Крім перегляду статусу, користувач має змогу ініціювати перевірку зв'язку з пристроєм або виконати віддалений перезапуск програмного забезпечення, встановленого на станції. Такий функціонал забезпечує базову дистанційну діагностику й адміністрування пристроїв без фізичного доступу до них.

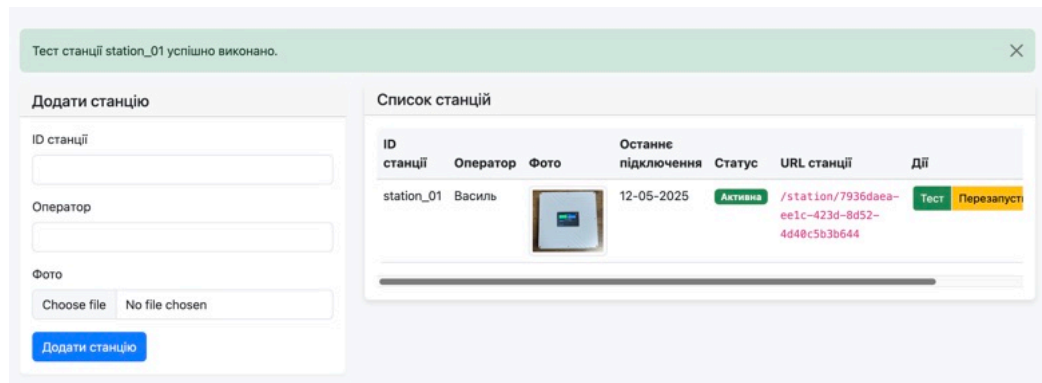


Рис. 4.19. Екранна додавання станції та списку активних пристроїв

Під час створення нового проєкту користувач повинен зазначити його назву, місце проведення вимірювань та моделювання, а також, за потреби, додати текстовий опис. Обов'язковим етапом є вибір однієї або кількох портативних станцій зі списку доступних у системі. Це дозволяє асоціювати проєкт із конкретними пристроями, які надалі використовуватимуться для збору даних. Для полегшення візуальної ідентифікації проєкту можливо додати зображення, що допоможе швидко відрізнити його серед інших. Одразу після створення новий проєкт з'являється у відповідному розділі користувацького інтерфейсу. За необхідності користувач може перейти на сторінку деталей проєкту, де доступні опції редагування параметрів або його видалення.

У системі проєкт виступає як основна одиниця організації роботи: він об'єднує пов'язані портативні станції, дані вимірювань, результати моделювання, територіальні прив'язки та перелік залучених користувачів. На сторінці кожного проєкту передбачено функціонал для запуску математичного

моделювання та налаштування параметрів відповідної моделі. Картографічна візуалізація реалізована у вигляді інтерактивної мапи, вбудованої через `iframe`, з можливістю керування шарами, що включають в себе ті чи інші геопросторові дані. Оновлення шару карти здійснюється через API-підключення до сервісу GeoNode, за участі розроблених класів-менеджерів, що забезпечують зв'язок між інтерфейсом веб-порталу, GeoNode та модулем комунікації з портативними станціями.

Для ініціації процесу моделювання користувач має задати початкові параметри рівняння у відповідній секції інтерфейсу вікна проєкту, зокрема коефіцієнти дифузії, швидкість вітру, джерело забруднення та часові межі.

Параметри моделювання

Розмір сітки Lx (м)	Розмір сітки Ly (м)	Кількість вузлів Nx	Кількість вузлів Ny	Крок часу dt (с)	Базовий К осідання λ
100	100	10	10	3600	0.01

Почати моделювання

Рис. 4.20. Встановлення початкових параметрів моделі

Сторінка проєкту містить окрему секцію де відображається список точок, та показники із сенсорів, отриманих під час виконання циклу замірів оператором портативної станції. При потребі можна вручну додати новий замір або ж видалити існуючий. Додатково таблиця відображає тип заміру (джерело забруднення чи контрольна точка). На рисунку 4.21 наведено основні екрани системи та навігацію між ними.

У рамках імплементації візуалізації результатів моделювання поширення мікропластику було реалізовано механізм перетворення сітки результатів моделі, створеної у середовищі MATLAB, у формат растрового зображення GeoTIFF. Модель генерує тривимірний масив даних, що складається зі сітки координатних вузлів (x , y) та відповідного їм поля концентрацій C у кожному вузлів. Для подальшого опрацювання у середовищі

трансформувати ці результати у формат, що враховує просторову прив'язку до глобальної системи координат.

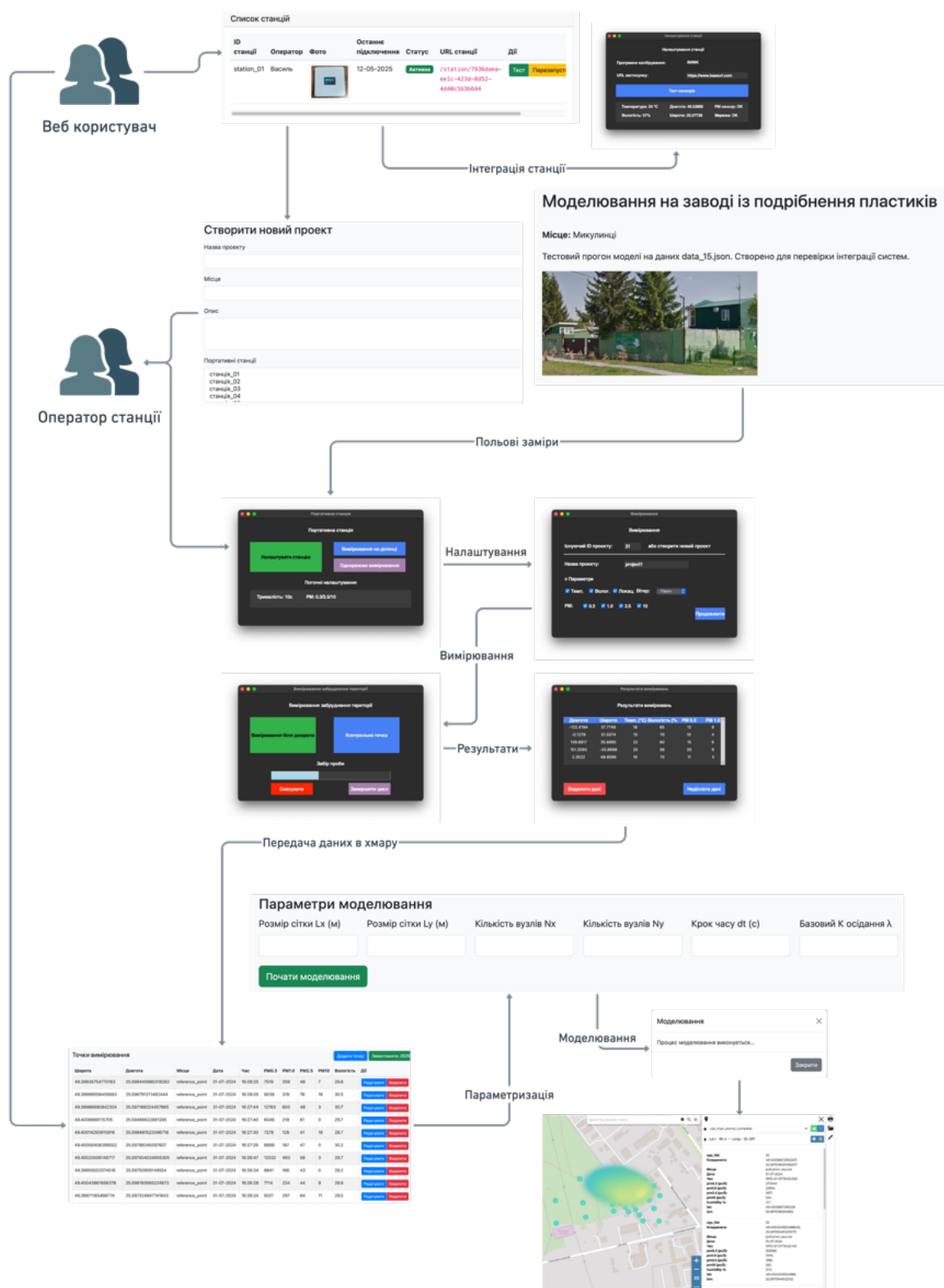


Рис. 4.21. Основні екрани системи та навігація між ними

Таким чином на основі координат x та y розраховується просторовий розмір пікселя, який визначає геометричну роздільну здатність майбутнього растру. Визначення здійснюється як абсолютне значення різниці між суміжними елементами координатної сітки, що гарантує відповідність масштабу картографічної проєкції. Для прив'язки растрового зображення використовується геотрансформація `from_origin`, яка базується на координатах верхнього лівого кута сітки.

```

6 # Завантаження результатів моделювання з файлу .mat
7 data = scipy.io.loadmat("adr_result.mat")
8 X = data["X"]
9 Y = data["Y"]
10 C = data["C"]
11
12 # Обчислення розміру пікселя за координатною сіткою
13 res_x = np.abs(X[0, 1] - X[0, 0])
14 res_y = np.abs(Y[1, 0] - Y[0, 0])
15
16 # Визначення трансформації для верхнього лівого кута сітки
17 transform = from_origin(X.min(), Y.max(), res_x, res_y)
18
19 # Експорт до GeoTIFF із заданою проєкцією (WGS84)
20 with rasterio.open(
21     "pollution_zone.tif",
22     "w",
23     driver="GTiff",
24     height=C.shape[0],
25     width=C.shape[1],
26     count=1,
27     dtype="float32",
28     crs="EPSG:4326",
29     transform=transform,
30 ) as tif:
31     tif.write(C.astype("float32"), 1)

```

Рис. 4.22. Перетворення результат виконання моделі у растрове зображення

Подальше збереження даних у форматі GeoTIFF здійснюється з використанням бібліотеки `rasterio`, яка дозволяє явно вказати систему координат, тип даних, трансформацію та структурні параметри шару. Отриманий файл є растровим шаром що відображає геодані, де кожен точка зберігає значення концентрації мікропластику, розрахованого моделлю. Цей файл передається у GeoNode через API, де відображається у вигляді нового шару на карті. Після завантаження шар може бути стилізований за допомогою інструментів візуалізації, наприклад, через градієнт кольорів, що відображає концентраційні зони.

Висновки до розділу 4

1. Здійснено проєктування системи із урахуванням вимог цільового користувача, предметної області та особливостей компонентів системи. Відображено варіанти використання системи, основний функціонал, послідовність та взаємодію між компонентами системи.

2. Спроектовано структуру реляційної бази даних за принципом data-first, що забезпечує коректну та гнучку організацію інформаційних сутностей; візуалізацію схеми виконано за допомогою ERD-діаграм, а для ефективної роботи з геопросторовими даними інтегровано спеціалізовані надбудови PostgreSQL – PostGIS.

3. Розроблено комплексну архітектуру програмно-апаратного рішення: веб-порталу для управління проєктами та моделювання поширення мікропластику і портативної станції вимірювання концентрації завислих речовин; результати представлено у вигляді діаграм класів, загальної системної архітектури та хмарної схеми розгортання на AWS, описано способи інтеграції компонентів і послідовність виконання функціоналу, а також реалізовано й продемонстровано користувацькі інтерфейси обох частин системи.

4. Наведено реалізацію програмного забезпечення системи для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери. Наведено діаграми та схеми, що ілюструють особливості програмної реалізації середовища для моделювання поширення мікропластику.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладне завдання – забезпечення адекватного просторового аналізу забруднення атмосфери мікропластиком та зменшення витрат на вимірювання його концентрації шляхом розробки математичного та програмного забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери з особливим акцентом на оцінку внеску таких значущих джерел забруднення, як об'єкти сфери поводження з ТПВ та дорожня інфраструктура. При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

1. Проведено комплексний аналіз проблеми забруднення довкілля мікропластиком, який підтвердив її глобальну значущість та виявив ключову роль атмосферного перенесення у розповсюдженні мікропластику. Ідентифіковано основні антропогенні джерела, зокрема об'єкти сфери поводження з ТПВ та дорожню інфраструктуру. Критичний огляд існуючих методів моніторингу та математичного моделювання поширення мікропластику виявив їхні суттєві обмеження: недостатню стандартизацію, високу вартість і трудомісткість моніторингових процедур; неадекватність спрощених моделей для опису фізичних властивостей мікропластику; обчислювальну складність та проблеми ефективної інтеграції з ГІС для обґрунтованих моделей. Результати аналізу підтвердили актуальність та визначили напрями дисертаційного дослідження;

2. В роботі обґрунтовано та розроблено математичну модель перенесення мікропластику в приземному шарі атмосфери, що базується на рівнянні адвекції-дифузії-реакції. Модель враховує ключові процеси, що визначають поширення мікропластику: перенесення вітром (адвекція), турбулентне розсіювання (дифузія) та видалення з атмосфери (осадження, змодельоване через реакцію). Запропоновано та обґрунтовано новий метод адаптивного налаштування параметрів розробленої моделі, що використовує гібридні методи оптимізації та оперує з інтервальними оцінками обмежених

вибірок даних моніторингу. Це дозволяє коректно враховувати притаманну експериментальним даним невизначеність та забезпечувати гарантовану точність модельних прогнозів у межах цієї невизначеності;

3. Розроблено комбінований метод інтервальної оцінки концентрації мікропластику в пробах атмосферного повітря. Даний метод, поєднує польові вимірювання загальної концентрації завислих речовин з лабораторним аналізом мікропластику на обмеженій вибірці даних для встановлення інтервального значення частки вмісту мікропластику в ЗР. Такий підхід забезпечує суттєве (на порядок) зниження вартості та часових затрат на моніторинг порівняно з традиційними методами, надаючи при цьому інтервальні оцінки концентрації у точках вимірювань, що уможливлює адаптивне налаштування параметрів та верифікацію математичних моделей із заданою точністю. Зокрема, для сміттепереробних підприємств, на основі запропонованої методики точність математичних моделей поширення мікропластику базуючись на вимірюваннях PM10 становила 15%, на основі PM2.5 – 10%;

4. Розроблено алгоритмічне забезпечення для практичної реалізації запропонованих методів моделювання. Зокрема, розроблено обчислювальні алгоритми, що реалізують чисельні схеми (на основі методів скінченних різниць, upwind схеми) для розв'язання рівняння адвекції-дифузії-реакції, а також алгоритми інтеграції вхідних даних та обчислювальних модулів із використанням ГІС, алгоритмів для використання гібридних процедур оптимізації цільової функції із використанням обчислювального модуля розв'язування рівняння АДР в ході адаптивного налаштування параметрів моделі з використанням інтервальних даних на обмеженій вибірці вимірювань;

5. На основі розробленої загальної методології моделювання розроблено комплекс, адаптованих на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції, математичних моделей поширення мікропластику від ключових типів антропогенних джерел. Розроблено математичні моделі для точкових (на

прикладі сміттєпереробних підприємств), поверхневих (на прикладі звалищ ТПВ) та лінійних (на прикладі автомобільних доріг) джерел. Такі моделі, на відміну від існуючих узагальнених підходів, враховують специфіку геометрії та характеру емісії МП для кожного типу джерела, що забезпечує підвищення адекватності та точності моделювання їхнього впливу на довкілля, зокрема, для поверхневих джерел (полігони ТПВ), точність моделей склала до 10%.

6. Розроблено нові архітектурні рішення та реалізовано програмну інтеграцію розробленого комплексу методів і математичних моделей у геоінформаційну систему. Запропонована гібридна архітектура, що поєднує елементи тісного зв'язування (для ефективної роботи з геоданими та візуалізації у ГІС) та сервісно-орієнтований підхід (для гнучкого підключення зовнішніх обчислювальних модулів моделювання та адаптивного налаштування параметрів), забезпечує високий рівень масштабованості, гнучкості та оптимізований робочий процес. Реалізована на основі цих рішень програмна система надає користувачеві інтегроване із ГІС середовище для комплексного моделювання поширення МП в приземному шарі атмосфери.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alcaras, E.; Amoroso, P.P.; Figliomeni, F.G.; Parente, C. Geographic Information System (GIS) for Ecology: A Bibliometric Network Analysis. *Ecol. Quest.* 2024, 35, 1–21. <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.006>
2. Alturas, B. (2023). Connection between UML use case diagrams and UML class diagrams: a matrix proposal. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 72(3), 161–168. <https://doi.org/10.1504/ijcat.2023.133294>
3. Amazon Web Services, Inc. (2023). Overview of Amazon Web Services. <https://docs.aws.amazon.com/pdfs/whitepapers/latest/aws-overview/aws-overview.pdf>
4. Amesho, K.T.T.; Chinglenthoba, C.; Samsudin, M.S.A.B.; Lani, M.N.; Pandey, A.; Desa, M.N.M.; Suresh, V. Microplastics in the Environment: An Urgent Need for Coordinated Waste Management Policies and Strategies. *J. Environ. Manag.* 2023, 344, 118038. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479723015013>.
5. Andoh, C.N.; Attiogbe, F.; Ackerson, N.O.B.; Antwi, M.; Adu-Boahen, K. Fourier Transform Infrared Spectroscopy: An Analytical Technique for Microplastic Identification and Quantification. *Infrared Phys. Technol.* 2024, 136, 105070. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.105070>
6. Andrady, A.L. Microplastics in the Marine Environment. *Mar. Pollut. Bull.* 2011, 62, 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
7. Arpia, A.A.; Chen, W.-H.; Ubando, A.T.; Naqvi, S.R.; Culaba, A.B. Microplastic Degradation as a Sustainable Concurrent Approach for Producing Biofuel and Obliterating Hazardous Environmental Effects: A State-of-the-Art Review. *J. Hazard. Mater.* 2021, 418, 126294. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421013455>

8. Bahadur, F.T.; Shah, S.R.; Nidamanuri, R.R. Air Pollution Monitoring, and Modelling: An Overview. *Environ. Forensics* 2023, 25, 309–336. <https://doi.org/10.1080/15275922.2023.2297437>.
9. Bakir, A.; Rowland, S.J.; Thompson, R.C. Competitive Sorption of Persistent Organic Pollutants onto Microplastics in the Marine Environment. *Mar. Pollut. Bull.* 2012, 64, 2782–2789. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.09.010>
10. Balla, D. and Gede, M.: Beautiful thematic maps in Leaflet with automatic data classification, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-4/W12-2024, 3–10, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W12-2024-3-2024>, 2024.
11. Ballent, A.; Corcoran, P.L.; Madden, O.; Helm, P.A.; Longstaffe, F.J. Sources and Sinks of Microplastics in Canadian Lake Ontario Nearshore, Tributary and Beach Sediments. *Mar. Pollut. Bull.* 2016, 110, 383–395.
12. Benduch, P. (2017). Comparison of the results of spatial analyses performed in arcgis and qgis software. <https://doi.org/10.14597/INFRAECO.2017.4.3.143>
13. Bharath, M.; Natesan, U.; Vaikunth, R.; Kumar, P.; Ruthra, R.; Srinivasalu, S. Spatial Distribution of Microplastic Concentration around Landfill Sites and Its Potential Risk on Groundwater. *Chemosphere* 2021, 277, 130263. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521007323>.
14. Bhat, M.A.; Gedik, K.; Gaga, E.O. Atmospheric Micro (Nano) Plastics: Future Growing Concerns for Human Health. *Air Qual. Atmos. Health* 2023, 16, 233–262. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01272-2>
15. Bodor, A.; Feigl, G.; Kolossa, B.; Mészáros, E.; Laczi, K.; Kovács, E.; Perei, K.; Rákhely, G. Soils in Distress: The Impacts and Ecological Risks of (Micro)Plastic Pollution in the Terrestrial Environment. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2024, 269, 115091. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651323013118>
16. Bojago, E.; Tyagi, I.; Ahamad, F.; Chandniha, S.K. GIS Based Spatial-Temporal Distribution of Water Quality Parameters and Heavy Metals in Drinking

Water: Ecological and Health Modelling. *Phys. Chem. Earth* 2023, 130, 103399. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103399>

17. Bordós, G.; Urbányi, B.; Micsinai, A.; Kriszt, B.; Palotai, Z.; Szabó, I.; Hantosi, Z.; Szoboszlay, S. Identification of Microplastics in Fish Ponds and Natural Freshwater Environments of the Carpathian Basin, Europe. *Chemosphere* 2019, 216, 110–116.

18. Borra, Praveen. (2024). Comparison and Analysis of Leading Cloud Service Providers (AWS, Azure and GCP). *International Journal of Advanced Research in Engineering & Technology*. 15. 266-278. 10.17605/osf.io/t2dhw.

19. Brander, S.M.; Renick, V.C.; Foley, M.M.; Steele, C.; Woo, M.; Lusher, A.; Carr, S.; Helm, P.; Box, C.; Cherniak, S.; Andrews, R.C.; Rochman, C.M. Sampling and Quality Assurance and Quality Control: A Guide for Scientists Investigating the Occurrence of Microplastics across Matrices. *Appl. Spectrosc.* 2020, 74, 1099–1125. <https://doi.org/10.1177/0003702820945713>

20. Braun, M.; Mail, M.; Krupp, A.E.; Amelung, W. Microplastic Contamination of Soil: Are Input Pathways by Compost Overridden by Littering? *Sci. Total Environ.* 2023, 855, 158889.

21. Bucklin, D.; Basille, M. rpostgis: Linking R with a PostGIS Spatial Database. *The R Journal* 2018, 10(1), 251–268. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-025>.

22. Bulatovic, Vladimir & Ninkov, Toša & Sušić, Zoran. (2010). Open geospatial consortium web services in complex distribution systems [J]. *Geodetski List*. 64. 607-619.

23. Cakaj, A.; Lisiak-Zielińska, M.; Drzewiecka, K.; Budka, A.; Borowiak, K.; Drapikowska, M.; Cakaj, A.; Qorri, E.; Szkudlarz, P. Potential Impact of Urban Land Use on Microplastic Atmospheric Deposition: A Case Study in Pristina City, Kosovo. *Sustainability* 2023, 15, 16464. <https://doi.org/10.3390/su152316464>

24. Carbery, M.; Connor, W.O.; Thavamani, P. Trophic Transfer of Microplastics and Mixed Contaminants in the Marine Food Web and Implications

for Human Health. *Environ. Int.* 2018, 115, 400–409.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.007>

25. Chen, G.; Fu, Z.; Yang, H.; Wang, J. An Overview of Analytical Methods for Detecting Microplastics in the Atmosphere. *TrAC Trends Anal. Chem.* 2020, 130, 115981. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115981>

26. Chen, S. A Global Treaty to End Plastic Pollution Is in Sight. UNDP Blog, 22 November 2023. Available online: <https://www.undp.org/blog/global-treaty-end-plastic-pollution-sight> (accessed on [вкажи дату доступу]).

27. Christou, G.; Georgiou, A.; Christodoulou, E.; Tziakouri, M.; Christodoulou, C.; Kasinopoulou, S.; Panayiotou, C.G.; Savva, A. Design and Development of a GIS-Based Platform Using Open Source Components for Monitoring, Maintenance and Management of Road Network: The Case Study of Cyprus. *ISPRS Arch.* 2021, XLVI-4/W2-2021, 37–42. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W2-2021-37-2021>

28. Cindy Bullard, J.E.; Ockelford, A.; O'Brien, P.; McKenna Neuman, C. Preferential Transport of Microplastics by Wind. *Atmos. Environ.* 2021, 245, 118038.

29. Claessens, M.; De Meester, S.; Van Landuyt, L.; et al. Occurrence and Distribution of Microplastics in Marine Sediments along the Belgian Coast. *Mar. Pollut. Bull.* 2011, 62, 2199–2204. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.030>

30. Coetzee, S.; Ivánová, I.; Mitasova, H.; Brovelli, M.A. Open Geospatial Software and Data: A Review of the Current State and a Perspective into the Future. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 9, 90. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020090>

31. Cong, Z. GIS Platform Ecological Water Environment Pollution Automatic Monitoring and Analysis. *J. Comput. Electron. Inf. Manag.* 2024, 12, 59–62. <https://doi.org/10.54097/7wxt04o0>

32. Corti P, Bartoli F, Fabiani A, Giovando C, Kralidis AT, Tzotsos A. 2019. GeoNode: an open source framework to build spatial data infrastructures. *PeerJ Preprints* 7:e27534v1 <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27534v1>

33. Cui, S.; Yu, W.; Han, X.; Hu, T.; Yu, M.; Liang, Y.; Guo, S.; Ma, J.; Teng, L.; Liu, Z. Factors Influencing the Distribution, Risk, and Transport of Microplastics and Heavy Metals for Wildlife and Habitats in “Island” Landscapes: From Source to Sink. *J. Hazard. Mater.* 2024, 476, 134938. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134938>.
34. De Lira-Quezada, C.E.; González-Díaz, S.N.; Cotera-de Lira, A.G.; Macouzet-Sánchez, C.; Acuña-Ortega, N.; Guzman-Avilán, R.I.; Macías-Weinmann, A. The Association of Air Pollution in Respiratory Allergy: Its Impact in an Industrial City. *World Allergy Organ. J.* 2024, 17, 100867. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2023.100867>
35. Din, K.U.; Boori, M.S.; Zainab, A. A Review of Eco-Environmental Changes and Their Impact on Ecology. In Proceedings of the 2024 X International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, Russian Federation, 2024; pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITNT60778.2024.10582320>
36. Ding, J.; Ren, C.; Wang, J.; Feng, Z.; Cao, S.-J. Spatial and Temporal Urban Air Pollution Patterns Based on Limited Data of Monitoring Stations. *J. Clean. Prod.* 2024, 434, 140359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140359>.
37. Ding, L.; Ma, L.; Li, L.; Liu, C.; Li, N.; Yang, Z.; Yao, Y.; Lu, H. A Survey of Remote Sensing and Geographic Information System Applications for Flash Floods. *Remote Sens.* 2021, 13, 1818. <https://doi.org/10.3390/rs13091818>
38. Django introduction [Elektronnyj resurs] // Mozilla Developer Network (MDN). – Rezhym dostupu: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Server-side/Django/Introduction>. – Nazva z ekrana.
39. Dockery, D.W.; Pope, C.A. II; Xu, X.; Spengler, J.D.; Ware, J.H.; Fay, M.E.; Ferris, B.G. Jr.; Speizer, F.E. An Association Between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *N. Engl. J. Med.* 1993, 329, 1753–1759. <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>

40. Du, R.; Lin, H.; Sun, J.; Zhang, J.; Luo, J.; Huang, X.; Pan, Z. Unveiling the Suspended Atmospheric Microplastic Pollution in a Coastal Urban Landscape. *J. Clean. Prod.* 2024, 442, 141145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141145>.
41. Edo, C.; Fernández-Piñas, F.; Leganes, F.; Gómez, M.; Martínez, I.; Herrera, A.; Hernández-Sánchez, C.; González-Sálamo, J.; Hernández Borges, J.; López-Castellanos, J.; et al. A Nationwide Monitoring of Atmospheric Microplastic Deposition. *Sci. Total Environ.* 2023, 905, 166923. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166923>.
42. Evangeliou, N.; Grythe, H.; Klimont, Z.; Heyes, C.; Eckhardt, S.; Lopez-Aparicio, S.; Stohl, A. Atmospheric Transport Is a Major Pathway of Microplastics to Remote Regions. *Nat. Commun.* 2020, 11, 3381. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17201-9>.
43. Fahim, M.A.S.; Sužiedelytė Visockienė, J. Air Pollution Sources and Their Impact on the Environment. *Moksl. Lietuvos Ateitis / Sci. Future Lith.* 2024, 16. <https://doi.org/10.3846/mla.2024.21293>
44. Faifura V., Bondar O., Faifura V. Ecological-Spatial Aspects of Pollution in the Region by Elastoplastic Micromasses. *Економічний дискурс.* 2024. № 1–2. С. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2024-1-5>.
45. Faifura V., Manzhula V., Tsiaputa A., Striletskyi M., Franko Y. Review of GIS Architecture for Environmental Monitoring: from Standalone Monoliths to AI-Ready Systems. *CEUR Workshop Proceedings.* 2023. Vol. 3974. P. 50–62. <https://ceur-ws.org/Vol-3974/paper05.pdf> (Scopus).
46. Faifura V., Spivak I., Krepych S. Context-Aware Invasive Plant Instance Synthesis for UAV-Based Crop Field Image Augmentation. *Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT.* 2023. P. 614–617. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275663> (Scopus).
47. Faifura, V.; Bondar, O.; Faifura, V. Ecological-Spatial Aspects of Pollution in the Region by Elastoplastic Micromasses. *Ekon. Dyskurs* 2024, (1–2), 44–51. <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2024-1-5>.

48. Farkas, G. Applicability of open-source web mapping libraries for building massive Web GIS clients. *J Geogr Syst* 19, 273–295 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10109-017-0248-z>
49. Flores-Cortez, O.O.; Pocasangre, C.O.; Arevalo, F.; Castillo, B.A.; Segovia, L.D. Mobile Air Quality Sensor System for GIS Mapping, Study Case in San Salvador City. In *Proceedings of the 2024 IEEE Andescon*, Cusco, Peru, 2024; pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON61840.2024.10755697>
50. Gao, W., Chen, N., Chen, J., Gao, B., Xu, Y., Weng, X., & Jiang, X. (2024). A Novel and Extensible Remote Sensing Collaboration Platform: Architecture Design and Prototype Implementation. *ISPRS Int. J. Geo Inf.*, 13, 83. <https://doi.org/10.3390/ijgi13030083>.
51. Garcia, M.A.; Liu, R.; Nihart, A.; El Hayek, E.; Castillo, E.; Barrozo, E.R.; Suter, M.A.; Bleske, B.; Scott, J.; Forsythe, K.; Gonzalez-Estrella, J.; Aagaard, K.M.; Campen, M.J. Quantitation and Identification of Microplastics Accumulation in Human Placental Specimens Using Pyrolysis Gas Chromatography Mass Spectrometry. *Toxicol. Sci.* 2024, 199, 81–88. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfae021>
52. Gigault, J.; ter Halle, A.; Baudrimont, M.; Pascal, P.-Y.; Gauffre, F.; Phi, T.-L.; El Hadri, H.; Grassl, B.; Reynaud, S. Current Opinion: What Is a Nanoplastic? *Environ. Pollut.* 2018, 235, 1030–1034. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>
53. Gupta, Bulbul & Mittal, Pooja & Mufti, Tabish. (2021). A Review on Amazon Web Service (AWS), Microsoft Azure & Google Cloud Platform (GCP) Services. 10.4108/eai.27-2-2020.2303255.
54. Habeeb, N.J.; Weli, S.T. Combination of GIS with Different Technologies for Water Quality: An Overview. *HighTech Innov. J.* 2021, 2, 3. <https://doi.org/10.28991/HIJ-2021-02-03-10>
55. Haque, F.; Fan, C. Fate of Microplastics under the Influence of Climate Change. *iScience* 2023, 26(9), 107649. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107649>

56. Harker, K.J.; Arnold, L.; Sutherland, I.J.; Gergel, S.E. Perspectives from Landscape Ecology Can Improve Environmental Impact Assessment. *FACETS* 2021, 6, 358–378. <https://doi.org/10.1139/facets-2020-0049>.
57. Hartmann, N.B.; Rist, S.; Baun, A. Aquatic Ecotoxicity Testing of Nanoplastics (and Microplastics)—Lessons Learned from Nanoecotoxicology. In *SETAC Europe 26th Annual Meeting—Abstract Book*; SETAC Europe: 2016; pp. 43–44.
58. Hosen, B.; Rahaman, M.; Kumar, S.; Sagar, L.; Akhtar, M.N. Leveraging Artificial Intelligence and Big Data for Advanced Spatial Analytics and Decision Support Systems in Geography. *Malays. Appl. Geogr.* 2023, 1, 62–67.
59. Hu, E.; Sun, C.; Yang, F.; Wang, Y.; Hu, L.; Wang, L.; Li, M.; Gao, L. Microplastics in 48 Wastewater Treatment Plants Reveal Regional Differences in Physical Characteristics and Shape-Dependent Removal in the Transition Zone between North and South China. *Sci. Total Environ.* 2022, 834, 155320. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722024135>
60. Hüffer, T.; Praetorius, A.; Wagner, S.; von der Kammer, F.; Hofmann, T. Microplastic Exposure Assessment in Aquatic Environments: Learning from Similarities and Differences to Engineered Nanoparticles. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 2499–2507. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04054>
61. Illuminati, S.; Notarstefano, V.; Tinari, C.; Fanelli, M.; Girolametti, F.; Ajdini, B.; Scarchilli, C.; Ciardini, V.; Iaccarino, A.; Giorgini, E.; et al. Microplastics in Bulk Atmospheric Deposition along the Coastal Region of Victoria Land, Antarctica. *Sci. Total Environ.* 2024, 949, 175221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175221>.
62. Jahan, K.; Pradhanang, S.M.; Bhuiyan, M.A.E. Surface Runoff Responses to Suburban Growth: An Integration of Remote Sensing, GIS, and Curve Number. *Land* 2021, 10(5), 452. <https://doi.org/10.3390/land10050452>
63. Jain, R.; Gaur, A.; Suravajhala, R.; Chauhan, U.; Pant, M.; Tripathi, V.; Pant, G. Microplastic Pollution: Understanding Microbial Degradation and

Strategies for Pollutant Reduction. *Sci. Total Environ.* 2023, 905, 168723. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972305725X>

64. Jephcote, C.; Gulliver, J. Development and Evaluation of Rapid, National-Scale Outdoor Air Pollution Modelling and Exposure Assessment: Hybrid Air Dispersion Exposure System (HADES). *Environ. Int.* 2025, 109304. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109304>.

65. Juvanhol, R.S.; Fiedler, N.C.; Dos Santos, A.R.; Da Silva, G.F.; Omena, M.S.; Eugenio, F.C.; Pinheiro, C.J.G.; Ferraz Filho, A.C. GIS and Fuzzy Logic Applied to Modelling Forest Fire Risk. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 2021, 93(suppl 3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190726>.

66. Kairuz-Cabrera, D.; Hernandez-Rodriguez, V.; Schalm, O.; Martinez, A.; Laso, P.M.; Alejo-Sánchez, D. Development of a Unified IoT Platform for Assessing Meteorological and Air Quality Data in a Tropical Environment. *Sensors* 2024, 24, 2729. <https://doi.org/10.3390/s24092729>.

67. Karabulut, A.İ.; Yazici-Karabulut, B.; Derin, P.; et al. Landfill Siting for Municipal Solid Waste Using Remote Sensing and Geographic Information System Integrated Analytic Hierarchy Process and Simple Additive Weighting Methods from the Point of View of a Fast-Growing Metropolitan Area in GAP Area of Turkey. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022, 29, 4044–4061. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15951-7>.

68. Karami, M.; McMorro, G.V.; Wang, L. Continuous Monitoring of Indoor Environmental Quality Using an Arduino-Based Data Acquisition System. *J. Build. Eng.* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.05.014>.

69. Karki, A.; Thaiba, B.M.; Acharya, K.C.S.; Sedai, T.; Kandel, B.; Paudyal, H.; Sharma, K.R.; Giri, B.; Neupane, B.B. Smartphone Microscopic Method for Imaging and Quantification of Microplastics in Drinking Water. *Microsc. Res. Tech.* 2024, 87, 2266–2274. <https://doi.org/10.1002/jemt.24596>

70. Khan, S., & Mohiuddin, K. (2018, January). Evaluating the parameters of ArcGIS and QGIS for GIS Applications. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 7(Special Issue 3). <http://www.ijarse.com>

71. Klein, M.; Fischer, E.K. Microplastic Abundance in Atmospheric Deposition within the Metropolitan Area of Hamburg, Germany. *Sci. Total Environ.* 2019, 685, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.405>.
72. Kole, P.J.; et al. Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 1265.
73. Lakvai B., Zaur A. Rozrobka metodyloghii kalibruvannja dlja malovartisnogho sensora SDS011 z urakhuvannjam profesijnoji etalonnoji aparatury [Elektronnyj resurs] / B. Lakvai, A. Zaur. – 2017. – Rezhym dostupu: https://www.researchgate.net/publication/322628807_Development_of_a_Calibration_Methodology_for_the_SDS011_Low-Cost_PM-Sensor_with_respect_to_Professional_Reference_Instrumentation.
74. Landwirtschaftlich genutzte Böden stark mit Mikroplastik belastet. Top Agrar Online. https://www.topagrar.com/acker/news/landwirtschaftlich-genutzte-boeden-stark-mit-mikroplastik-belastet-12450295.html?utm_campaign=start&utm_source=topagrar&utm_medium=referral (accessed on 14 January 2021).
75. Lausch, A. Assessment of Landscape Pattern and Landscape Functions by Application of GIS and Remote Sensing. *Trans. Ecol. Environ.* 2001, 46, WIT Press. <https://doi.org/10.2495/ECO010361>.
76. Leonard, J.; El Rassi, L.A.; Abdul Samad, M.; Prehn, S.; Mohanty, S.K. The Relative Importance of Local Climate and Land Use on the Deposition Rate of Airborne Microplastics on Terrestrial Land. *Atmos. Environ.* 2024, 318, 120212. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120212>.
77. Li, Z.; Huan, N. Autonomous GIS: The Next-Generation AI-Powered GIS. *Int. J. Digit. Earth* 2023, 16, 4668–4686. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2278895>.
78. Liu, Z.; Liu, X.; Bai, Y.; et al. Spatiotemporal Distribution and Potential Sources of Atmospheric Microplastic Deposition in a Semiarid Urban Environment of Northwest China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023, 30, 74372–74385. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27581-2>.

79. Lu, H.-C.; Ziajahromi, S.; Neale, P.A.; Leusch, F.D.L. A Systematic Review of Freshwater Microplastics in Water and Sediments: Recommendations for Harmonisation to Enhance Future Study Comparisons. *Sci. Total Environ.* 2021, 781, 146693. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721017617>
80. Maksymenko, N.; Kliesch, A.; Gololobova, O.; Sonko, S. Spatial Modeling of Air Pollution in Kharkiv City. *J. Geol. Geogr. Geoecol.* 2024, 33, 108–117. <https://doi.org/10.15421/112412>.
81. Manzhula V., Dyvak M., Melnyk A., Faifura V., Momotiuk E. Identification of Models of Static Systems with Nonlinear Characteristics Based on Interval Data Analysis. *International Journal of Computing.* 2025. Vol. 24. No. 1. P. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3872>.
82. Nova Fitness Co., Ltd. Laser PM2.5 Sensor: specification. Product model: SDS011 [Elektronnyj resurs] / Nova Fitness Co., Ltd. – 2015-10-09. – Rezhym dostupu: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf>.
83. O'Brien, S.; Rauert, C.; Ribeiro, F.; Okoffo, E.D.; Burrows, S.D.; O'Brien, J.W.; Wang, X.; Wright, S.L.; Thomas, K.V. There's Something in the Air: A Review of Sources, Prevalence and Behaviour of Microplastics in the Atmosphere. *Sci. Total Environ.* 2023, 874, 162193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162193>.
84. O'Brine, T.; Thompson, R.C. Degradation of Plastic Carrier Bags in the Marine Environment. *Mar. Pollut. Bull.* 2010, 60, 2279–2283. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.08.005>
85. Ogata, Y.; Takada, H.; Mizukawa, K.; et al. International Pellet Watch: Global Monitoring of Persistent Organic Pollutants (POPs) in Coastal Waters. 1. Initial Phase Data on PCBs, DDTs, and HCHs. *Mar. Pollut. Bull.* 2009, 58, 1437–1446. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.06.014>.

86. Oguchi, T.; Jarvie, H.P.; Neal, C. River Water Quality in the Humber Catchment: An Introduction Using GIS-Based Mapping and Analysis. *Sci. Total Environ.* 2000, 251–252, 9–26. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00411-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00411-3).
87. Ojeniren O., Modupe O., Otitola A., Abiona O., Adeusu A., Oladapo O. Kompleksnyj ohljad vykorystannja khmarnykh tekhnolohij dlja masshtabovanosti ta stijkosti u rozrobci prohramnoho zabezpechennja // *International Journal of Science and Research Archive*. – 2024. – T. 11. – S. 330-337. – DOI: <https://doi.org/10.30574/ijsra.2024.11.2.0432>.
88. Padala, R.S.; Aneesh, M. Morphometric Analysis of Watersheds: A Comprehensive Review of Data Sources, Quality, and Geospatial Techniques. *Watershed Ecol. Environ.* 2024, 6, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>.
89. Parra, L. Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring. *Appl. Sci.* 2022, 12, 8045. <https://doi.org/10.3390/app12168045>.
90. Perrino, C. Atmospheric Particulate Matter. In *Proceedings of a C.I.S.B. Minisymposium*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2010; pp. 35–43. <https://doi.org/10.1002/9780470999318.ch9>.
91. Rane, J.; Kaya, O.; Mallick, S.K.; Rane, N.L. Artificial Intelligence-Powered Spatial Analysis and ChatGPT-Driven Interpretation of Remote Sensing and GIS Data. In *Generative Artificial Intelligence in Agriculture, Education, and Business*; Deep Science Publishing: 2024; pp. 162–217. https://doi.org/10.70593/978-81-981271-7-4_5.
92. Rashid, A.; Ayub, M.; Ullah, Z.; Ali, A.; Sardar, T.; Iqbal, J.; Gao, X.; Bundschuh, J.; Li, C.; Khattak, S.A.; et al. Groundwater Quality, Health Risk Assessment, and Source Distribution of Heavy Metals Contamination around Chromite Mines: Application of GIS, Sustainable Groundwater Management, Geostatistics, PCAMLR, and PMF Receptor Model. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 2113. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032113>.
93. Raubenheimer, K. Scientists Reviewed 7,000 Studies on Microplastics. Their Alarming Conclusion Puts Humanity on Notice. *The Conversation*, 19

September 2024. Available online: <https://theconversation.com/scientists-reviewed-7-000-studies-on-microplastics-their-alarming-conclusion-puts-humanity-on-notice-239105> (accessed on 11 April 2025).

94. Ren, J.; Li, R.; Jia, F.; Yang, X.; Luo, Y.; Wu, C.; Wang, W.; Yang, Y. Fine-Granularity Urban Microclimate Monitoring Using Wearable Multi-Source Sensors. *Sustainability* 2021, 13, 14062. <https://doi.org/10.3390/su132414062>.

95. Rosati, L.; Carraturo, F.; Capozzi, F.; Chianese, T.; La Pietra, A.; Salamone, M.; Spagnuolo, V.; Ferrandino, I.; Giordano, S. Microplastics' Impact on the Environment and the Challenging Selection of Reliable Key Biomonitorers. *Water* 2024, 16, 2637. <https://doi.org/10.3390/w16182637>.

96. Rudiastuti, Aninda & Suryanegara, Ellen & Wirawan, Ade & Purwanto, Bayu & Gill, Suzan & Prihanto, Yosef & Windiastuti, Rizka & Munawaroh, Munawaroh. (2020). Design and Implementation of a User-Centered Web-App using Open Source Platform: Indonesia Disaster Data (InDITA). *JOIV : International Journal on Informatics Visualization*. 4. 10.30630/joiv.4.4.460.

97. Sandhya, M.C. Exploring Opportunities with Open Source GIS. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)* 2020, 9(5). <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS050545>

98. Sarau, G.; Kling, L.; Oßmann, B.E.; Unger, A.-K.; Vogler, F.; Christiansen, S.H. Correlative Microscopy and Spectroscopy Workflow for Microplastics. *Appl. Spectrosc.* 2020, 74, 1155–1160. <https://doi.org/10.1177/0003702820916250>.

99. Sefiloglu, F.Ö.; Stratmann, C.N.; Brits, M.; van Velzen, M.J.M.; Groenewoud, Q.; Vethaak, A.D.; Dris, R.; Gasperi, J.; Lamoree, M.H. Comparative Microplastic Analysis in Urban Waters Using μ -FTIR and Py-GC-MS: A Case Study in Amsterdam. *Environ. Pollut.* 2024, 351, 124088. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124088>.

100. Shabani, Babak & Ali-Lavroff, Jason & Holloway, Damien & Penev, Spiridon & Dessi, Daniele & Thomas, Giles. (2020). Machine Learning and Cloud Computing for Remote Monitoring of Wave Piercing Catamarans: A Case Study

using MATLAB on Amazon Web Services. Smart Ship Technology Conference 2020. 83-94. 10.3940/sst.20.11.

101. Sharma, S.; Beslity, J.O.; Rustad, L.; Shelby, L.J.; Manos, P.T.; Khanal, P.; Reinmann, A.B.; Khanal, C. Remote Sensing and GIS in Natural Resource Management: Comparing Tools and Emphasizing the Importance of In-Situ Data. *Remote Sens.* 2024, 16, 4161. <https://doi.org/10.3390/rs16224161>.

102. Sherpa, S.; Després, L. The Evolutionary Dynamics of Biological Invasions: A Multi-Approach Perspective. *Evol. Appl.* 2021, 14, 1463–1484. <https://doi.org/10.1111/eva.13215>.

103. Shit, P.K.; Datta, D.K.; Bera, B.; Islam, A.; Adhikary, P.P. *Spatial Modeling of Environmental Pollution and Ecological Risk*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2023; p. 475.

104. Sidharthan, K.; Gandhimathi, A.; Akshayaa, M. Spatial Variation of Air Pollutants by Using GIS Modelling. *Glob. Nest J.* 2024, 26, 05230. <https://doi.org/10.30955/gnj.005230>.

105. Silva López, J.O.; Salas López, R.; Rojas Briceño, N.B.; Gómez Fernández, D.; Terrones Murga, R.E.; Iliquín Trigos, D.; Barboza Castillo, E.; Oliva Cruz, M.; Barrena Gurbillón, M.Á. Analytic Hierarchy Process (AHP) for a Landfill Site Selection in Chachapoyas and Huancas (NW Peru): Modeling in a GIS-RS Environment. *Adv. Civ. Eng.* 2022, 2022, 9733322. <https://doi.org/10.1155/2022/9733322>.

106. Silva, A.L.P.; Prata, J.C.; Duarte, A.C.; Soares, A.M.V.M.; Barceló, D.; Rocha-Santos, T. Microplastics in Landfill Leachates: The Need for Reconnaissance Studies and Remediation Technologies. *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 2021, 3, 100072.

107. Stefanidis, S.P.; Chatzichristaki, C.A.; Stefanidis, P.S. An ArcGIS Toolbox for Estimation and Mapping Soil Erosion. *J. Environ. Prot. Ecol.* 2021, 22, 689–696.

108. Steiniger, S.; Hunter, A.J.S. *The 2012 Free and Open Source GIS Software Map – A Guide to Facilitate Research, Development, and Adoption*.

Comput. Environ. Urban Syst. 2013, 39, 136–150.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.10.003>.

109. Sultana, N. The Potential of Open-Source Internet GIS as an In-House and Out-Reach Communication Interface in Regional Environmental Management: Exemplification from Phillip Island, Victoria, Australia. ResearchGate 2012. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/318233556>.

110. Sun, J.; Zhu, Z.-R.; Li, W.-H.; Yan, X.; Wang, L.-K.; Zhang, L.; Jin, J.; Dai, X.; Ni, B.-J. Revisiting Microplastics in Landfill Leachate: Unnoticed Tiny Microplastics and Their Fate in Treatment Works. Water Res. 2021, 190, 116784. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116784>.

111. Svensson, N.; Andersson-Sköld, Y. Spridningsmodeller för Mikroplast från Däck- och Vägsitage. Dispersion and Fate Models for Microplastics from Tyre and Road Wear – State of the Art and Possibilities. VTI Rapport 2021, 1061A, 39 pp.

112. Svensson, N.; Engardt, M.; Gustafsson, M.; Andersson-Sköld, Y. Modelled Atmospheric Concentration of Tyre Wear in an Urban Environment. Atmos. Environ. X. Available online: <https://www.journals.elsevier.com/atmospheric-environment-x> (accessed on [вкази дату доступу]).

113. Thompson, R.C.; Courteney-Jones, W.; Boucher, J.; Pahl, S.; Raubenheimer, K.; Koelmans, A.A. Twenty Years of Microplastic Pollution Research – What Have We Learned? Science 2024, 386, ead12746. <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>.

114. Thompson, R.C.; Moore, C.J.; Vom Saal, F.S.; Swan, S.H. Lost at Sea: Where Is All the Plastic? Science 2004, 304, 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.

115. Torres-Agullo, A.; Zuri, G.; Lacorte, S. Pyr-GC-Orbitrap-MS Method for the Target/Untargeted Analysis of Microplastics in Air. J. Hazard. Mater. 2024, 469, 133981. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133981>

116. Trozzi, C.; Vaccaro, R.; Trobbiani, R.; Digiovandomenico, P. Geographical Information Systems for Air Quality Management Planning. *Trans. Inf. Commun. Technol.* 1998, 18. WIT Press. Available online: <https://www.witpress.com> (accessed on [вкази дату доступу]).

117. Trysnyuk, T.V. Система мобільного екологічного моніторингу Дністра: моделювання технічної системи гідроресурсів та екстремальних паводків. *Екол. безпека та природокористування* 2021, 38, 121–128. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.2.121-128>.

118. Tsapa, Joseph Aaron. (2024). Architecting for Resilience: Best Practices for Building Secure and Reliable Software Infrastructure in AWS Cloud. *Journal of Artificial Intelligence & Cloud Computing*. 1-3. 10.47363/JAICC/2024(3)270.

119. Tymchyshyn V., Melnyk A., Faifura V., Tymchyshyn B., Mazur I.-S., Honchar L. Data Management Service Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. *Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT*. 2024. P. 678–682. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712526>.

120. Tymchyshyn V., Melnyk A., Manzhula V., Faifura V., Romanets I., Tymchyshyn B. The System Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. *Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT*. 2023. P. 58–62. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275416> (Scopus).

121. Uyaguari, A.; Rocha, Á.; Guarda, T. Open Source Web Software Architecture Components for Geographic Information Systems in the Last 5 Years: A Systematic Mapping Study. In *Proceedings of the International Conference on Information Technology & Systems (ICITS 2018)*; Rocha, Á., Guarda, T., Eds.; *Advances in Intelligent Systems and Computing*; Springer: Cham, Switzerland, 2018; Volume 721. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_65.

122. Van-Hiep, H.; Minh-Ky, N.; Tuan-Dung, H.; Minh Cuong, H.; Nguyen Thi Thanh, H.; Vu Khac Hoang, B.; Minh-Thuan, P.; Cong-Manh, N.; Woong Chang, S.; Duc Nguyen, D. Sources, Environmental Fate, and Impacts of

Microplastic Contamination in Agricultural Soils: A Comprehensive Review. *Sci. Total Environ.* 2024, 950, 175276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175276>.

123. Ventura, S. M. R., & Prata, A. (2021). Comparative WebGIS Software Study: How to Support Users Decisions on the Best Solution to Their Organizations (pp. 286–305). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4099-2.CH013>.

124. Verma, S.; Gangwar, T.; Singh, J.; Prakash, D.; Payra, S. Urban Air Quality Monitoring and Modelling Using Ground Monitoring, Remote Sensing, and GIS. In *Geospatial Analytics for Environmental Pollution Modeling*; Mushtaq, F., Farooq, M., Mukherjee, A.B., Ghosh Nee Lala, M., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45300-7_9.

125. Verschoor, A.J. Towards a Definition of Microplastics: Considerations for the Specification of Physico-Chemical Properties. RIVM Letter Report 2015, 2015-0116.

126. Wagner, M.; Scherer, C.; Alvarez-Muñoz, D.; et al. Microplastics in Freshwater Ecosystems: What We Know and What We Need to Know. *Environ. Sci. Eur.* 2014, 26, 1–9. [https://doi.org/10.1016/0163-8343\(83\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0163-8343(83)90040-3).

127. Wan, Y.; Chen, X.; Liu, Q.; Hu, H.; Wu, C.; Xue, Q. Informal Landfill Contributes to the Pollution of Microplastics in the Surrounding Environment. *Environ. Pollut.* 2022, 293, 118586.

128. Wang, S.; Hu, T.; Xiao, H.; Li, Y.; Zhang, C.; Ning, H.; Ye, X. GPT, Large Language Models (LLMs) and Generative Artificial Intelligence (GAI) Models in Geospatial Science: A Systematic Review. *Int. J. Digit. Earth* 2024, 17(1). <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2353122>.

129. Wang, X., Yu, J., & Baumann, P. (2011). A Web Coverage Ontology for Geospatial Web Applications. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN TECHNOLOGY*, 216–223. <https://doi.org/10.1109/icsc.2011.73>

130. Wang, Z.-M.; Wagner, J.; Ghosal, S.; Bedi, G.; Wall, S. SEM/EDS and Optical Microscopy Analyses of Microplastics in Ocean Trawl and Fish Guts. *Sci. Total Environ.* 2017, 603–604, 616–626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.047>.

131. Wani, A.K.; Akhtar, N.; Mir, T. ul G.; Chopra, C.; Singh, R.; Hong, J.C.; Kadam, U.S. CRISPR/Cas12a-Based Biosensors for Environmental Monitoring and Diagnostics. *Environ. Technol. Innov.* 2024, 34, 103625. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103625>.
132. Ward, E.; Gordon, M.; Hanson, R.; Jantunen, L.M. Modelling the Effect of Shape on Atmospheric Microplastic Transport. *Atmos. Environ.* 2024, 326, 120458. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120458>.
133. Weber, D.; Schwieder, M.; Ritter, L.; Koch, T.; Psomas, A.; Huber, N.; Ginzler, C.; Boch, S. Grassland-Use Intensity Maps for Switzerland Based on Satellite Time Series: Challenges and Opportunities for Ecological Applications. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 2024, 10, 312–327. <https://doi.org/10.1002/rse2.372>.
134. Wei, L.; Yue, Q.; Chen, G.; Wang, J. Microplastics in Rainwater/Stormwater Environments: Influencing Factors, Sources, Transport, Fate, and Removal Techniques. *TrAC Trends Anal. Chem.* 2023, 165, 117147. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117147>.
135. Wei, Y.; Yu, Y.; Cao, X.; Wang, B.; Yu, D.; Wang, J.; Liu, Z. Remote Mountainous Area Inevitably Becomes Temporal Sink for Microplastics Driven by Atmospheric Transport. *Environ. Sci. Technol.* 2024, 58(30), 13380–13390. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00296>.
136. Wik, A.; Dave, G. Occurrence and Effects of Tire Wear Particles in the Environment—A Critical Review and an Initial Risk Assessment. *Environ. Pollut.* 2009, 157(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.09.028>.
137. Wright, R.; Gasperi, J.; Mirande, C.; Mandin, C.; Guerrouache, M.; Langlois, V.; Tassin, B. A First Overview of Textile Fibers, Including Microplastics, in Indoor and Outdoor Environments. *Environ. Pollut.* 2017, 221, 453–458. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>.
138. Wright, S.L.; Ulke, J.; Fullana Font, A.; Chan, K.L.A.; Kelly, F.J. Atmospheric Microplastic Deposition in an Urban Environment and an Evaluation of Transport. *Environ. Int.* 2020, 136, 105411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411>.

139. Yu, F.; Wu, Z.; Wang, J.; Li, Y.; Chu, R.; Pei, Y.; Ma, J. Effect of Landfill Age on the Physical and Chemical Characteristics of Waste Plastics/Microplastics in a Waste Landfill Sites. *Environ. Pollut.* 2022, 306, 119366. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749122005802>

140. Yuan, S.; Bao, F.; Zhang, X.; Li, Y. Severe Biomass-Burning Aerosol Pollution during the 2019 Amazon Wildfire and Its Direct Radiative-Forcing Impact: A Space Perspective from MODIS Retrievals. *Remote Sens.* 2022, 14(9), 2080. <https://doi.org/10.3390/rs14092080>.

141. Zambelli, Pietro & Gebbert, Sören & Ciolli, Marco. (2013). Pygrass: An Object Oriented Python Application Programming Interface (API) for Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Geographic Information System (GIS). *International Journal of Geo-Information (IJGI)*. 2. 201-219. [10.3390/ijgi2010201](https://doi.org/10.3390/ijgi2010201).

142. Zhang, Y.; Kang, S.; Allen, S.; Allen, D.; Gao, T.; Sillanpää, M. Atmospheric Microplastics: A Review on Current Status and Perspectives. *Earth-Sci. Rev.* 2020, 203, 103118.

143. Zhang, Z.; Geng, Y.; Zhou, W.; Shao, X.; Lin, H.; Zhou, Y. Development of a Multi-Spectroscopy Method Coupling μ -FTIR and μ -Raman Analysis for One-Stop Detection of Microplastics in Environmental and Biological Samples. *Sci. Total Environ.* 2024, 917, 170396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170396>.

144. Zhao, P.; Zhang, F.; Lin, H.; Xu, S. GIS-Based Forest Fire Risk Model: A Case Study in Laoshan National Forest Park, Nanjing. *Remote Sens.* 2021, 13(18), 3704. <https://doi.org/10.3390/rs13183704>.

145. Балака М., Міщук Д., Паламарчук Д. Сучасні уявлення про механізм зносу протекторних гум // Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. – 2021. – № 98. – С. 30–36.

146. Балака М., Паламарчук Д., Новохацький П. Механізм втомного зносу протектора пневматичних шин // Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем : тези

доп. наук.-практ. конф. (Рівне, 9–11 листоп. 2020 р.). – Рівне : НУВГП, 2020. – С. 104–105.

147. Бридун А., Согор А., Фис М., Губар Ю. Вебкартографування забруднення поверхневих вод Львівщини засобами ГІС та ДЗЗ // Технічні науки та технології. – 2024. – № 1(35). – С. 337–345. – DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-337-345](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-337-345).

148. Бялий М. Оцінка інформативності геоінформаційних систем військового призначення // Технічні науки та технології. – 2024. – № 3(37). – С. 132–142. – DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3\(37\)-132-142](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-132-142).

149. Валерко Р. А., Герасимчук Л. О., Романчук Л. Д. ГІС як інструмент контролю та управління у сфері нецентралізованого водопостачання у межах ОТГ : монографія. – Житомир : Поліський національний університет, 2022. – 165 с.

150. Васькіна І. В. Оцінка техногенного навантаження на придорожні екосистеми : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01 / Сумський державний університет. – Суми, 2018. – URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/68004/1/diss_Vaskina.pdf.

151. Ємельянов В. О., Насєдкін Є. І., Куковська Т. С., Митрофанова О. А., Довбиш С. М. Дослідження пластику та мікропластику в геоекосистемі Чорного моря як складової оцінки її забруднення // Український географічний журнал. – 2023. – № 4. – С. 26–35.

152. Кірсанова В. В., Биковець Н. П., Чумаченко М. М. Пластикові упаковки на морських судах у контексті глобальної екологічної проблеми мікропластику // Екологічні науки. – 2020. – № 2(29), т. 1. – С. 164–169.

153. Клипа А. Перспективи застосування ГІС-технологій при оцінці військового впливу на урбанізовані та прилеглі території // Просторовий розвиток. – 2024. – № 9. – С. 238–249. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.9.238-249>.

154. Коваленко Л. О., Гунько І. С. Визначення викидів забруднюючих речовин з урахуванням режимів руху транспортного потоку // Екологічні

науки. – 2020. – № 1(28). – С. 206–210. – DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eso.1-28.32>.

155. Ковальчук М., Крошко Ю. Паспортизація породних відвалів вуглевидобувних територій – основа створення їх ГІС-системи та оцінки впливу на довкілля // Гірнича геологія та геоecологія. – 2022. – № 1(2). – С. 35–51. – DOI: [https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2021.1\(2\).251868](https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2021.1(2).251868).

156. Коріненко Б. В. Мікропластик як глобальне джерело забруднення навколишнього середовища // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2022. – № 6. – С. 6–12.

157. Мадані М. М. Вплив автотранспорту на трансформацію екосистем придорожніх зон // Аграрні інновації. – 2023. – № 17. – С. 99–106.

158. Макаров В. А., Макарова Т. В., Чернега В. Ю. До оцінки ефективності функціонування системи «колесо-дорога» // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : електрон. зб. тез доп. XV міжнар. наук.-практ. конф. (Житомир, 24–26 жовт. 2022 р.). – URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/93.pdf2>.

159. Манжула В., Файфура В. Архітектура геоінформаційної системи для моніторингу та моделювання поширення мікропластичних мас у повітрі. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Том 347. № 1. С. 512–522. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-70>.

160. Манжула В., Файфура В. Моделювання поширення концентрації мікропластику у атмосфері для об'єктів сфери поводження з ТПВ. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”. 2025. № 1 (40). С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2025-1-40-60-69>.

161. Матейчик В. П., Гришук О. К., Вайганг Г. О., Блажчук О. В. Визначення викидів забруднюючих речовин з урахуванням режимів руху транспортного потоку // Вісник НТУ. Серія: Технічні науки. – 2015. – Вип. 2(32). – С. 174–181.

162. Русіло П. О., Костюк В. В., Афонін В. М. Вплив на довкілля автомобільного транспорту на всіх стадіях його життєвого циклу // Науковий вісник НЛТУ України. – 2008. – Вип. 18. – С. 85–89.

163. Сафранов Т. А., Приходько В. Ю., Михайленко В. І. Відходи пластикових матеріалів: оцінка утворення та поводження в регіонах Північно-західного Причорномор'я // Український гідрометеорологічний журнал. – 2023. – № 31. – С. 122–130.

164. Транспортна екологія : навч. посіб. / О. І. Запорожець, С. В. Бойченко, О. Л. Матвєєва, С. Й. Шаманський, Т. І. Дмитруха, С. М. Маджд ; за заг. ред. С. В. Бойченка. – К. : НАУ, 2017. – 507 с.

165. Файфура В. В., Співак І. Я., Файфура В. В. Удосконалення методів дистанційного розпізнавання поширення інвазійних видів рослин в контексті оцінювання потенційних збитків навколишньому середовищу та сільському господарству // Інноваційна економіка. – 2023. – С. 116–124.

166. Файфура В., Бицюра Л., Файфура В. Забруднення довкілля мікропластичними масами в контексті моделювання його просторового поширення. Освіта, наука, бізнес, енергетичні технології: сучасний стан, проблеми та перспективи: матеріали XIII Національної науково-практичної конференції. 2024. С. 76–78. <http://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/52354>.

167. Файфура В., Манжула В., Файфура В. Еколого-просторові аспекти забруднення території Тернопільської області мікропластичними масами // Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України. – 2023. – № 28. – С. 59–71. – DOI: <https://doi.org/10.35774/rarrpsu2023.28.059>.

168. Файфура В., Манжула В., Файфура В. Еколого-просторові аспекти забруднення території Тернопільської області мікропластичними масами. Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України. 2023. № 28. С. 59–71. DOI: <https://doi.org/10.35774/rarrpsu2023.28.059>.

169. Фортуна М.В., Борисовська О.О. Оцінка забруднення водного середовища мікропластиком. – URL: <https://znp.nmu.org.ua/pdf/2021/65/PDF/18.pdf>.

170. Харченко В.В. Використання геоінформаційних систем для потреб ландшафтного районування України // Природнича освіта та наука. – 2024. – № 4. – С. 119–127.

171. Чернега В.Ю. Вплив автомобільних шин у процесі експлуатації на навколишнє середовище. – URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2024/paper/view/20888/17319>.

172. Шевчук С.М., Пуденко О. Р. Можливості використання технологій ГІС та ДЗЗ при екологічному моніторингу Макухівського сміттєзвалища в Полтавській області // Scientific Progress & Innovations. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 165–174. – DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.02.20>.

173. Юрченко В. О., Мельнікова О. Г., Пономарьов К. С., Самохвалова А. І. Мікропластик в донних відкладеннях річок на урбанізованих територіях // Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики і рішення : міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (Харків, 2–3 листоп. 2021 р.). – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – С. 134–136.

ДОДАТОК А

DDL БАЗИ ДАНИХ СИСТЕМИ

```
-- Environmental Monitoring System Database Schema
-- Author: vfai
-- Created: 2024-03-15
-- Last Modified: 2024-03-17
```

```
CREATE TABLE users (
  user_id SERIAL PRIMARY KEY,
  user_name VARCHAR(100) NOT NULL,
  email VARCHAR(255) UNIQUE NOT NULL,
  role VARCHAR(50) NOT NULL,
  password_hash VARCHAR(255) NOT NULL,
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  updated_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP
);
```

```
CREATE TABLE projects (
  project_id SERIAL PRIMARY KEY,
  project_name VARCHAR(200) NOT NULL,
  description TEXT,
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  updated_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  created_by INTEGER REFERENCES users(user_id),
  updated_by INTEGER REFERENCES users(user_id)
);
```

```
-- PostGIS / spatial addon
CREATE TABLE areas (
  area_id SERIAL PRIMARY KEY,
  area_name VARCHAR(200) NOT NULL,
  description TEXT,
  location GEOMETRY(POLYGON, 4326),
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  updated_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP
);
```

```
CREATE TABLE stations (
  station_id SERIAL PRIMARY KEY,
  station_name VARCHAR(200) NOT NULL,
  area_id INTEGER REFERENCES areas(area_id),
  last_communication TIMESTAMP, -- when did we last hear from this station?
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP);
```

```

-- Device configs
CREATE TABLE deviceconfigurations (
  config_id SERIAL PRIMARY KEY,
  station_id INTEGER REFERENCES stations(station_id),
  config_name VARCHAR(200) NOT NULL,
  config_value TEXT,
  applied_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP
);

-- measurement cycles = для батчів
CREATE TABLE measurementcycles (
  cycle_id SERIAL PRIMARY KEY,
  project_id INTEGER REFERENCES projects(project_id),
  station_id INTEGER REFERENCES stations(station_id),
  start_time TIMESTAMP NOT NULL,
  end_time TIMESTAMP, -- null if still running
  notes TEXT
);

-- measurements
CREATE TABLE measurementpoints (
  point_id SERIAL PRIMARY KEY,
  cycle_id INTEGER REFERENCES measurementcycles(cycle_id),
  record_time TIMESTAMP NOT NULL,
  point_type VARCHAR(50),
  pm03 DECIMAL(10,4),
  pm25 DECIMAL(10,4),
  pm10 DECIMAL(10,4),
  temperature DECIMAL(8,2),
  humidity DECIMAL(5,2),
  location GEOMETRY(POINT, 4326) -- PostGIS, записувати через кому
);

-- modeling parameters - key/value
CREATE TABLE modelingparameters (
  parameter_id SERIAL PRIMARY KEY,
  project_id INTEGER REFERENCES projects(project_id),
  parameter_name VARCHAR(200) NOT NULL,
  value TEXT,
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP
);

-- results from modeling runs
CREATE TABLE modelingresults (

```

```

result_id SERIAL PRIMARY KEY,
project_id INTEGER REFERENCES projects(project_id),
model_timestamp TIMESTAMP NOT NULL,
result_data JSONB, -- JSON
is_successful BOOLEAN DEFAULT FALSE,
mp_level DECIMAL(15,4) -- pm/m3
);

```

```

CREATE TABLE reports (
  report_id SERIAL PRIMARY KEY,
  project_id INTEGER REFERENCES projects(project_id),
  modeling_result_id INTEGER REFERENCES modelingresults(result_id),
  report_timestamp TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  report_data JSONB,
  description TEXT
);

```

-- PostGIS tables

```

CREATE TABLE spatial_ref_sys (
  srid INTEGER PRIMARY KEY,
  auth_name VARCHAR(256),
  auth_srid INTEGER,
  srtext VARCHAR(2048),
  proj4text VARCHAR(2048)
);

```

```

CREATE TABLE geography_columns (
  f_table_catalog VARCHAR(256),
  f_table_schema VARCHAR(256),
  f_table_name VARCHAR(256),
  f_geography_column VARCHAR(256),
  coord_dimension INTEGER,
  srid INTEGER,
  type VARCHAR(30)
);

```

```

CREATE TABLE geometry_columns (
  f_table_catalog VARCHAR(256),
  f_table_schema VARCHAR(256),
  f_table_name VARCHAR(256),
  f_geometry_column VARCHAR(256),
  coord_dimension INTEGER,
  srid INTEGER,
  type VARCHAR(30)
);

```

);

```
CREATE TABLE raster_overviews (
  o_table_catalog VARCHAR(256),
  o_table_schema VARCHAR(256),
  o_table_name VARCHAR(256),
  o_raster_column VARCHAR(256),
  r_table_catalog VARCHAR(256),
  r_table_schema VARCHAR(256),
  r_table_name VARCHAR(256),
  r_raster_column VARCHAR(256),
  overview_factor INTEGER
);
```

```
CREATE TABLE raster_columns (
  r_table_catalog VARCHAR(256),
  r_table_schema VARCHAR(256),
  r_table_name VARCHAR(256),
  r_raster_column VARCHAR(256),
  srid INTEGER,
  scale_x DOUBLE PRECISION,
  scale_y DOUBLE PRECISION,
  blocksize_x INTEGER,
  blocksize_y INTEGER,
  same_alignment BOOLEAN,
  regular_blocking BOOLEAN,
  num_bands INTEGER,
  pixel_types TEXT[],
  nodata_values DOUBLE PRECISION[],
  out_db BOOLEAN[],
  extent GEOMETRY,
  spatial_index BOOLEAN
);
```

-- Базові індекси

```
CREATE INDEX idx_users_email ON users(email);
CREATE INDEX idx_projects_name ON projects(project_name);
CREATE INDEX idx_stations_area ON stations(area_id);
CREATE INDEX idx_measurementcycles_project ON
measurementcycles(project_id);
CREATE INDEX idx_measurementcycles_station ON
measurementcycles(station_id);
CREATE INDEX idx_measurementpoints_cycle ON
measurementpoints(cycle_id);
```



```

CREATE INDEX idx_measurementpoints_time ON
measurementpoints(record_time);
CREATE INDEX idx_modelingparameters_project ON
modelingparameters(project_id);
CREATE INDEX idx_modelingresults_project ON modelingresults(project_id);
CREATE INDEX idx_reports_project ON reports(project_id);
CREATE INDEX idx_deviceconfigurations_station ON
deviceconfigurations(station_id);

-- геопросторові індекси
CREATE INDEX idx_areas_location ON areas USING GIST(location);
CREATE INDEX idx_measurementpoints_location ON measurementpoints
USING GIST(location);

-- валідація даних
ALTER TABLE measurementpoints ADD CONSTRAINT chk_humidity_range
CHECK (humidity >= 0 AND humidity <= 100);

ALTER TABLE measurementpoints ADD CONSTRAINT
chk_temperature_range
CHECK (temperature >= -50 AND temperature <= 80);

ALTER TABLE measurementcycles ADD CONSTRAINT chk_cycle_times
CHECK (end_time IS NULL OR end_time >= start_time);

-- auto-update
CREATE OR REPLACE FUNCTION update_updated_at_column()
RETURNS TRIGGER AS $$
BEGIN
    NEW.updated_at = CURRENT_TIMESTAMP;
    RETURN NEW;
END;
$$ language 'plpgsql';

CREATE TRIGGER update_users_updated_at BEFORE UPDATE ON users
FOR EACH ROW EXECUTE FUNCTION update_updated_at_column();

CREATE TRIGGER update_projects_updated_at BEFORE UPDATE ON projects
FOR EACH ROW EXECUTE FUNCTION update_updated_at_column();

CREATE TRIGGER update_areas_updated_at BEFORE UPDATE ON areas
FOR EACH ROW EXECUTE FUNCTION update_updated_at_column();

```

ДОДАТОК Б

ЛІСТИНГ КОДУ ОСНОВНИХ МОДУЛІВ ПРОГРАМИ

Лістинг коду основних класів портативної станції.

```
# перевірка чи ми на raspberry pi або на ПК
IS_RASPBERRY_PI = platform.machine().startswith('arm')

if IS_RASPBERRY_PI:
    try:
        import serial
        import Adafruit_DHT
        import pynmea2
    except ImportError:
        print("Raspberry Pi libraries not found, using mock data")
        IS_RASPBERRY_PI = False
    else:
        print("Running in development mode - using mock data")

class Configuration:
    def __init__(self):
        self.config_file = "config.json"
        self.config = self.load_config()

    def load_config(self) -> dict:
        try:
            with open(self.config_file, 'r') as f:
                return json.load(f)
        except FileNotFoundError:
            # create default config if none exists
            default = {
                "device_id": "station_001",
                "measurement_interval": 30,
                "upload_interval": 300,
                "api_endpoint": "https://api.example.com/uploadProcessedData",
                "api_key": "your_api_key_here",
                "sensors": {
                    "sds011": {"enabled": True, "port": "/dev/ttyUSB0", "baudrate": 9600,
"calibration_enabled": True},
                    "dht11": {"enabled": True, "pin": 4},
                    "gps": {"enabled": True, "port": "/dev/ttyUSB1", "baudrate": 9600}
                },
                "grid_config": {
                    "enabled": True,
                    "square_size_meters": 100,
```

```

        "node_distance_meters": 10,
        "auto_detect_arrival": True,
        "arrival_tolerance_meters": 5
    },
    "geofence_boundaries": {
        "default": {
            "minLat": 49.5, "maxLat": 49.6,
            "minLon": 23.5, "maxLon": 23.6
        }
    },
    "ui_theme": {
        "background_color": "#2c2c2c",
        "secondary_color": "#3d3d3d",
        "text_color": "#ffffff",
        "accent_color": "#4CAF50"
    }
}
with open(self.config_file, 'w') as f:
    json.dump(default, f, indent=2)
return default

def save_config(self):
    with open(self.config_file, 'w') as f:
        json.dump(self.config, f, indent=2)

def get(self, key: str, default=None):
    return self.config.get(key, default)

def set(self, key: str, value):
    self.config[key] = value

class SDS011Sensor:
    def __init__(self, port: str, calibration_enabled: bool = True):
        self.port = port
        self.serial_conn = None
        self.initialized = False
        self.calibration_enabled = calibration_enabled

    def initialize(self):
        if not IS_RASPBERRY_PI:
            self.initialized = True
            return True

    try:

```

```

self.serial_conn = serial.Serial(self.port, 9600, timeout=2)
self.initialized = True
return True
except Exception as e:
    print(f"SDS011 init failed: {e}")
    return False

def calibrate_pm25(self, pm25_raw, pm10_raw):
    # калібрування з дослідження згідно Bernd Laquai, Antonia Saur
    if pm25_raw <= 0 or pm10_raw <= 0:
        return pm25_raw

    ratio = pm10_raw / pm25_raw

    # формула :  $-0.509 * \ln(\text{PM10}/\text{PM2.5}) + 1.2203$ 
    calib_factor = -0.509 * math.log(ratio) + 1.2203

    if calib_factor > 0:
        result = pm25_raw / calib_factor
        return round(result, 1)
    else:
        return pm25_raw # фолбек у випадку помилки

def read(self) -> Dict[str, float]:
    if not IS_RASPBERRY_PI:
        # mock data for development
        import random
        pm25_raw = round(random.uniform(10, 50), 1)
        pm10_raw = round(random.uniform(15, 80), 1)
        pm03_raw = round(random.uniform(5, 30), 1)

        # калібрування якщо включено
        if self.calibration_enabled:
            pm25_calibrated = self.calibrate_pm25(pm25_raw, pm10_raw)
        else:
            pm25_calibrated = pm25_raw

    return {
        'pm25': pm25_calibrated,
        'pm10': pm10_raw,
        'pm03': pm03_raw,
        'pm25_raw': pm25_raw # калібрування значення
    }

```

```

if not self.initialized:
    return {'pm25': 0, 'pm10': 0, 'pm03': 0}

# зчитування даних з датчика
if IS_RASPBERRY_PI and self.serial_conn:
    try:
        # читаємо з SDS011 - протокол: 10 байт
        if self.serial_conn.in_waiting >= 10:
            data = self.serial_conn.read(10)
            if len(data) == 10 and data[0] == 0xAA and data[1] == 0xC0:
                pm25_raw = round((data[2] + data[3] * 256) / 10.0, 1)
                pm10_raw = round((data[4] + data[5] * 256) / 10.0, 1)
                pm03_raw = round(pm25_raw * 0.7, 1) # приблизна оцінка

                # калібрування якщо включено
                if self.calibration_enabled:
                    pm25_calibrated = self.calibrate_pm25(pm25_raw, pm10_raw)
                else:
                    pm25_calibrated = pm25_raw

            return {
                'pm25': pm25_calibrated,
                'pm10': pm10_raw,
                'pm03': pm03_raw,
                'pm25_raw': pm25_raw
            }
        except Exception as e:
            print(f"SDS011 read error: {e}")

# fallback - моки для тестування
import random
pm25_raw = round(random.uniform(10, 50), 1)
pm10_raw = round(random.uniform(15, 80), 1)
pm03_raw = round(random.uniform(5, 30), 1)

# калібрування якщо включено
if self.calibration_enabled:
    pm25_calibrated = self.calibrate_pm25(pm25_raw, pm10_raw)
else:
    pm25_calibrated = pm25_raw

return {
    'pm25': pm25_calibrated,
    'pm10': pm10_raw,

```

```

    'pm03': pm03_raw,
    'pm25_raw': pm25_raw # сире значення
}

class DHT11Sensor:
    def __init__(self, pin: int):
        self.pin = pin
        self.initialized = False

    def initialize(self):
        if not IS_RASPBERRY_PI:
            self.initialized = True
            return True

        try:
            # test (ініціалізація)
            if IS_RASPBERRY_PI:
                humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(Adafruit_DHT.DHT11,
self.pin)
                self.initialized = True
                return True
        except:
            return False

    def read(self) -> Dict[str, float]:
        if not IS_RASPBERRY_PI:
            import random
            return {
                'temperature': round(random.uniform(15, 35), 1),
                'humidity': round(random.uniform(30, 80), 1)
            }

        if not self.initialized:
            return {'temperature': 0, 'humidity': 0}

        try:
            if IS_RASPBERRY_PI:
                humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(Adafruit_DHT.DHT11,
self.pin)
                return {
                    'temperature': round(temperature, 1) if temperature else 0,
                    'humidity': round(humidity, 1) if humidity else 0
                }
        except:

```

```

    pass

    return {'temperature': 0, 'humidity': 0}

class GPSSensor:
    def __init__(self):
        self.port = "/dev/ttyUSB1" # default port
        self.serial_conn = None
        self.initialized = False

    def initialize(self):
        if not IS_RASPBERRY_PI:
            self.initialized = True
            return True

        try:
            self.serial_conn = serial.Serial(self.port, 9600, timeout=1)
            self.initialized = True
            return True
        except:
            return False

    def read(self) -> Dict[str, Union[float, bool]]:
        if not IS_RASPBERRY_PI:
            # Моки для відладки
            import random
            base_lat = 49.55
            base_lon = 23.55
            return {
                'latitude': round(base_lat + random.uniform(-0.01, 0.01), 6),
                'longitude': round(base_lon + random.uniform(-0.01, 0.01), 6),
                'fix': True
            }

        if not self.initialized:
            return {'latitude': 0, 'longitude': 0, 'fix': False}

        # читаємо з реального GPS
        try:
            if self.serial_conn and self.serial_conn.in_waiting:
                line = self.serial_conn.readline().decode('ascii', errors='replace')
                if line.startswith('$GPRMC') or line.startswith('$GPGLL'):
                    msg = pynmea2.parse(line)

```

```

        if hasattr(msg, 'latitude') and hasattr(msg, 'longitude') and msg.latitude and
msg.longitude:
            return {
                'latitude': float(msg.latitude),
                'longitude': float(msg.longitude),
                'fix': True
            }
        except Exception as e:
            print(f"GPS read error: {e}")

# fallback якщо немає сигналу
return {'latitude': 0, 'longitude': 0, 'fix': False}

def get_position(self):
    return self.read()

class SensorManager:
    def __init__(self, config: Configuration):
        self.config = config
        sds011_config = config.get("sensors", {}).get("sds011", {})
        self.sds011 = SDS011Sensor(
            sds011_config.get("port", "/dev/ttyUSB0"),
            sds011_config.get("calibration_enabled", True)
        )
        self.dht11 = DHT11Sensor(config.get("sensors", {}).get("dht11", {}).get("pin",
4))
        self.gps = GPSSensor()

    def read_all(self) -> dict:
        # зчитка з всіх сенсорів
        pm_data = self.sds011.read()
        temp_data = self.dht11.read()
        gps_data = self.gps.read()

        return {**pm_data, **temp_data, **gps_data}

class MicroplasticCalculator:
    def __init__(self, coefficient: float):
        self.coeff = coefficient

    def calculate(self, pm25: float, pm10: float) -> float:
        if not pm25 or not pm10:
            return 0
        # для локального моделювання

```



```
return round((pm25 * 0.3 + pm10 * 0.1) * self.coeff, 2)
```

```
class GridManager:
```

```
def __init__(self, grid_config: dict):
```

```
    self.grid_config = grid_config
```

```
    self.grid_points = []
```

```
    self.selected_points = []
```

```
    self.measured_points = []
```

```
    self.current_point_index = 0
```

```
    self.grid_center = None
```

```
    self.grid_bounds = None
```

```
def meters_to_degrees(self, meters: float, latitude: float) -> Tuple[float, float]:
```

```
    # метри в градуси
```

```
    lat_deg = meters / 111320.0
```

```
    lon_deg = meters / (111320.0 * math.cos(math.radians(latitude)))
```

```
    return lat_deg, lon_deg
```

```
def create_grid_from_gps(self, center_lat: float, center_lon: float,
```

```
    square_size_meters: float, node_distance_meters: float):
```

```
    if not self.grid_config.get("enabled", False):
```

```
        return
```

```
    self.grid_center = {"latitude": center_lat, "longitude": center_lon}
```

```
    # calc grid boundaries
```

```
    half_size = square_size_meters / 2
```

```
    lat_offset, lon_offset = self.meters_to_degrees(half_size, center_lat)
```

```
    self.grid_bounds = {
```

```
        "minLat": center_lat - lat_offset,
```

```
        "maxLat": center_lat + lat_offset,
```

```
        "minLon": center_lon - lon_offset,
```

```
        "maxLon": center_lon + lon_offset
```

```
    }
```

```
    # step size for nodes
```

```
    lat_step, lon_step = self.meters_to_degrees(node_distance_meters, center_lat)
```

```
    # generate points
```

```
    self.grid_points = []
```

```
    grid_id = 0
```

```
    current_lat = self.grid_bounds["minLat"]
```

```

y_idx = 0

while current_lat <= self.grid_bounds["maxLat"]:
    current_lon = self.grid_bounds["minLon"]
    x_idx = 0

    while current_lon <= self.grid_bounds["maxLon"]:
        self.grid_points.append({
            "grid_id": str(grid_id),
            "latitude": round(current_lat, 6),
            "longitude": round(current_lon, 6),
            "x_index": x_idx,
            "y_index": y_idx,
            "measured": False,
            "accessible": True,
            "measurement_data": None
        })
        current_lon += lon_step
        x_idx += 1
        grid_id += 1

    current_lat += lat_step
    y_idx += 1

    print(f'Generated {len(self.grid_points)} grid points in {square_size_meters}m
x {square_size_meters}m area")
    print(f'Grid center: {center_lat:.6f}, {center_lon:.6f}')
    print(f'Node spacing: {node_distance_meters}m')

def add_measurement_to_point(self, grid_id: str, measurement_data: dict):
    point = next((p for p in self.grid_points if p["grid_id"] == grid_id), None)
    if point:
        point["measured"] = True
        point["measurement_data"] = measurement_data
        if point not in self.measured_points:
            self.measured_points.append(point)

def find_nearest_grid_point(self, lat: float, lon: float) -> Optional[dict]:
    if not self.grid_points:
        return None

    min_dist = float('inf')
    nearest = None

```

```

for pt in self.grid_points:
    dist = self.calculate_distance(lat, lon, pt["latitude"], pt["longitude"])
    if dist < min_dist:
        min_dist = dist
        nearest = pt

return {**nearest, "distance": round(min_dist, 2)}

def save_grid_to_json(self, filename: str = "grid_measurements.json"):
    grid_data = {
        "metadata": {
            "created_at": datetime.now().isoformat(),
            "grid_center": self.grid_center,
            "grid_bounds": self.grid_bounds,
            "square_size_meters": self.grid_config.get("square_size_meters", 100),
            "node_distance_meters": self.grid_config.get("node_distance_meters", 10),
            "total_points": len(self.grid_points),
            "measured_points": len(self.measured_points)
        },
        "grid_points": self.grid_points,
        "measured_points": [p for p in self.grid_points if p["measured"]],
        "unmeasured_points": [p for p in self.grid_points if not p["measured"]]
    }

    try:
        with open(filename, 'w') as f:
            json.dump(grid_data, f, indent=2)
            print(f"Grid data saved to {filename}")
        return True
    except Exception as e:
        print(f"Error saving grid data: {e}")
        return False

def load_grid_from_json(self, filename: str = "grid_measurements.json"):
    try:
        with open(filename, 'r') as f:
            grid_data = json.load(f)

            self.grid_center = grid_data["metadata"]["grid_center"]
            self.grid_bounds = grid_data["metadata"]["grid_bounds"]
            self.grid_points = grid_data["grid_points"]
            self.measured_points = grid_data["measured_points"]

            print(f"Grid data loaded from {filename}")

```

```

        print(f"Loaded {len(self.grid_points)} points, {len(self.measured_points)}
measured")
        return True
    except Exception as e:
        print(f"Error loading grid data: {e}")
        return False

def calculate_distance(self, lat1: float, lon1: float, lat2: float, lon2: float) -> float:
    # haversine formula
    R = 6371000 # earth radius

    lat1_rad, lon1_rad = math.radians(lat1), math.radians(lon1)
    lat2_rad, lon2_rad = math.radians(lat2), math.radians(lon2)

    dlat = lat2_rad - lat1_rad
    dlon = lon2_rad - lon1_rad

    a = math.sin(dlat/2)**2 + math.cos(lat1_rad) * math.cos(lat2_rad) *
math.sin(dlon/2)**2
    c = 2 * math.atan2(math.sqrt(a), math.sqrt(1-a))

    return R * c

def get_grid_status(self) -> dict:
    measured_cnt = len(self.measured_points)
    total_cnt = len(self.grid_points)

    return {
        "grid_active": len(self.grid_points) > 0,
        "grid_center": self.grid_center,
        "total_grid_points": total_cnt,
        "measured_points": measured_cnt,
        "unmeasured_points": total_cnt - measured_cnt,
        "coverage_percentage": (measured_cnt / total_cnt * 100) if total_cnt > 0 else 0,
        "grid_bounds": self.grid_bounds
    }

class GeofenceManager:
    def __init__(self, boundaries: dict):
        self.boundaries = boundaries["default"]

    def check_location(self, latitude: float, longitude: float) -> bool:
        if not latitude or not longitude:
            return False

```



```

# project
self.current_project_id = None
self.current_project_name = None
self.current_cycle_id = None
self.cycle_start_time = None
self.cycle_points = []

def initializeSystem(self) -> bool:
    try:
        sds011_ok = self.sensor_manager.sds011.initialize()
        dht11_ok = self.sensor_manager.dht11.initialize()
        gps_ok = self.sensor_manager.gps.initialize()
        return all([sds011_ok, dht11_ok, gps_ok])
    except Exception as e:
        print(f"Error initializing system: {e}")
        return False

def update_config(self, new_config: dict):
    self.config.config = new_config
    self.config.save_config()

# ініціалізувати все
self.sensor_manager = SensorManager(self.config)
self.microplastic_calculator = MicroplasticCalculator(1.0)
self.geofence_manager = GeofenceManager(
    self.config.get("geofence_boundaries")
)
self.grid_manager = GridManager(
    self.config.get("grid_config", {})
)

api_endpoint = self.config.get("api_endpoint", "")
api_key = self.config.get("api_key", "")
self.communication_manager = CommunicationManager(api_endpoint,
api_key)

def start_measurement_cycle(self, project_name: str = None, project_id: str =
None):
    self.current_project_id = project_id
    self.current_project_name = project_name or "Default Project"
    self.current_cycle_id = str(uuid.uuid4())
    self.cycle_start_time = datetime.now().isoformat()
    self.cycle_points = []

```

```

def end_measurement_cycle(self) -> bool:
    if not self.current_cycle_id:
        print("No active measurement cycle")
        return False

    end_time = datetime.now().isoformat()

    upload_data = {
        "projectId": self.current_project_id,
        "projectName": self.current_project_name,
        "cycleId": self.current_cycle_id,
        "startTime": self.cycle_start_time,
        "endTime": end_time,
        "points": self.cycle_points
    }

    success = self.communication_manager.upload_cycle_data(upload_data)

    # скинути цикл
    self.current_cycle_id = None
    self.cycle_start_time = None
    self.cycle_points = []

    return success

def get_grid_status(self) -> dict:
    return self.grid_manager.get_grid_status()

def processData(self, point_type: str = "pollution_source") -> dict:
    # read sensors
    sensor_data = self.sensor_manager.read_all()

    # calc microplastic
    microplastic = self.microplastic_calculator.calculate(
        sensor_data.get('pm25'),
        sensor_data.get('pm10')
    )

    # check geofence
    in_geofence = self.geofence_manager.check_location(
        sensor_data.get('latitude'),
        sensor_data.get('longitude')
    )

```

```

# format for API
point_data = {
    "pointType": point_type,
    "sensorData": {
        "recordTime": datetime.now().isoformat(),
        "pm03": sensor_data.get('pm03'),
        "pm25": sensor_data.get('pm25'),
        "pm10": sensor_data.get('pm10'),
        "temperature": sensor_data.get('temperature'),
        "humidity": int(sensor_data.get('humidity', 0)) if sensor_data.get('humidity')
else None
    },
    "location": {
        "lat": sensor_data.get('latitude'),
        "lon": sensor_data.get('longitude')
    }
}

# додаємо до циклу якщо він активний
if self.current_cycle_id:
    self.cycle_points.append(point_data)

return {
    **sensor_data,
    'microplastic': microplastic,
    'in_geofence': in_geofence,
    'timestamp': int(time.time()),
    'point_data': point_data
}

def uploadData(self, data: Union[dict, List[dict]]) -> bool:
    return self.communication_manager.upload_data(data)

def get_stored_results(self) -> List[dict]:
    # локально не зберігаємо для прод версії, пустий список
    return []

# обгортки для UI (для імен класів)
class PMSensor:
    def __init__(self, config):
        sds011_config = config.get("sensors", {}).get("sds011", {})
        self.sds011 = SDS011Sensor(
            sds011_config.get("port", "/dev/ttyUSB0"),
            sds011_config.get("calibration_enabled", True)

```



```

    )

    def read_data(self):
        return self.sds011.read()

class TempHumiditySensor:
    def __init__(self, config):
        self.dht11 = DHT11Sensor(config.get("sensors", {}).get("dht11", {}).get("pin",
4))

    def read_data(self):
        return self.dht11.read()

class GPSLocationSensor:
    def __init__(self, config):
        self.gps = GPSSensor()

    def get_position(self):
        return self.gps.read()

```

ЛІСТИНГ КОДУ ВЕБ-СИСТЕМИ

Base Project Model

```

class Project(models.Model):
    project_name = models.CharField(_("Project Name"), max_length=200)
    description = models.TextField(_("Description"), blank=True, null=True)
    created_at = models.DateTimeField(_("Created At"), auto_now_add=True)
    updated_at = models.DateTimeField(_("Updated At"), auto_now=True)
    created_by = models.ForeignKey(
        settings.AUTH_USER_MODEL,
        on_delete=models.SET_NULL,
        related_name='created_projects',
        null=True,
        blank=True
    )

```

Station Management

```

class Station(models.Model):
    station_name = models.CharField(_("Station Name"), max_length=200)
    area = models.ForeignKey(Area, on_delete=models.SET_NULL, null=True,
blank=True)
    last_communication = models.DateTimeField(_("Last Communication"),
null=True, blank=True)
    status = models.CharField(_("Status"), max_length=50, default='active')
    configuration = models.JSONField(_("Configuration"), default=dict)

```

Sensor Data Collection

```

class SensorReading(models.Model):
    station = models.ForeignKey(Station, on_delete=models.CASCADE)
    timestamp = models.DateTimeField(_("Timestamp"))
    pm0_3 = models.DecimalField(_("PM0.3"), max_digits=10, decimal_places=4)
    pm2_5 = models.DecimalField(_("PM2.5"), max_digits=10, decimal_places=4)
    pm10 = models.DecimalField(_("PM10"), max_digits=10, decimal_places=4)
    temperature = models.DecimalField(_("Temperature"), max_digits=8,
decimal_places=2)
    humidity = models.DecimalField(_("Humidity"), max_digits=5,
decimal_places=2)
    gps_lat = models.DecimalField(_("GPS Latitude"), max_digits=9,
decimal_places=6)
    gps_lon = models.DecimalField(_("GPS Longitude"), max_digits=9,
decimal_places=6)
    raw_payload = models.JSONField(_("Raw Payload"))
    processed = models.BooleanField(_("Processed"), default=False)

```

Mathematical Modeling

```

class MathematicalModel(models.Model):
    name = models.CharField(_("Name"), max_length=200)
    description = models.TextField(_("Description"))
    parameters_schema = models.JSONField(_("Parameters Schema"))
    configuration = models.JSONField(_("Configuration"), default=dict)
    model_version = models.CharField(_("Model Version"), max_length=50)

```

Modeling Task Management

```

class ModellingTask(models.Model):
    STATUS_CHOICES = [
        ('pending', 'Pending'),
        ('running', 'Running'),
        ('completed', 'Completed'),
        ('failed', 'Failed')
    ]
    status = models.CharField(max_length=20, choices=STATUS_CHOICES,
default='pending')
    created_at = models.DateTimeField(auto_now_add=True)
    started_at = models.DateTimeField(null=True, blank=True)
    finished_at = models.DateTimeField(null=True, blank=True)
    model = models.ForeignKey(MathematicalModel,
on_delete=models.CASCADE)
    input_data = models.ManyToManyField(SensorReading)

```

```

result = models.ForeignKey('ModellingResult', on_delete=models.SET_NULL,
null=True)
trigger_source = models.CharField(max_length=50, default='manual')
remote_triggered = models.BooleanField(default=False)

```

ОСНОВНА БІЗНЕС-ЛОГІКА

Sensor Data Processing

```

def add_sensor_reading(request, project_id):
    project = get_object_or_404(Project, pk=project_id)
    if request.method == 'POST':
        form = SensorReadingForm(request.POST)
        if form.is_valid():
            reading = form.save(commit=False)
            reading.raw_payload = {
                'pm0_3': float(reading.pm0_3),
                'pm2_5': float(reading.pm2_5),
                'pm10': float(reading.pm10),
                'temperature': float(reading.temperature),
                'humidity': float(reading.humidity)
            }
            reading.save()
            messages.success(request, 'Sensor reading added successfully.')
            return redirect('project_detail', project_id=project.id)
    return redirect('project_detail', project_id=project.id)

```

Modeling Task Execution

```

def run_modelling_task(request, task_id):
    task = get_object_or_404(ModellingTask, pk=task_id)
    try:
        task.run()
        messages.success(request, 'Modelling task completed successfully.')
    except Exception as e:
        messages.error(request, f'Error running modelling task: {str(e)}')
    return redirect('project_detail', project_id=task.model.project.id)

```

Bulk Data Processing

```

def bulk_upload_readings(request, project_id):
    project = get_object_or_404(Project, pk=project_id)
    if request.method == 'POST':
        form = SensorReadingBulkUploadForm(request.POST, request.FILES)
        if form.is_valid():
            try:
                data = json.load(request.FILES['file'])
                for reading_data in data:

```

```

SensorReading.objects.create(
    station=project.stations.get(id=reading_data['station_id']),
    timestamp=datetime.fromisoformat(reading_data['timestamp']),
    pm0_3=reading_data['pm0_3'],
    pm2_5=reading_data['pm2_5'],
    pm10=reading_data['pm10'],
    temperature=reading_data['temperature'],
    humidity=reading_data['humidity'],
    gps_lat=reading_data['gps_lat'],
    gps_lon=reading_data['gps_lon'],
    raw_payload=reading_data
)
messages.success(request, 'Sensor readings uploaded successfully.')
except Exception as e:
    messages.error(request, f'Error uploading file: {str(e)}')
return redirect('project_detail', project_id=project_id)

```

Робота з UI (формами)

```

class SensorReadingForm(forms.ModelForm):
    class Meta:
        model = SensorReading
        fields = [
            'station', 'timestamp', 'pm0_3', 'pm2_5', 'pm10',
            'temperature', 'humidity', 'gps_lat', 'gps_lon'
        ]
        widgets = {
            'timestamp': forms.DateTimeInput(attrs={'type': 'datetime-local'}),
            'gps_lat': forms.NumberInput(attrs={'step': '0.000001'}),
            'gps_lon': forms.NumberInput(attrs={'step': '0.000001'}),
        }

class MathematicalModelForm(forms.ModelForm):
    class Meta:
        model = MathematicalModel
        fields = ['name', 'description', 'parameters_schema', 'configuration',
            'model_version']
        widgets = {
            'parameters_schema': forms.JSONField(),
            'configuration': forms.JSONField(),
        }

```

ДОДАТОК В

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Манжула В., Файфура В. Архітектура геоінформаційної системи для моніторингу та моделювання поширення мікропластичних мас у повітрі. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Том 347. № 1. С. 512–522. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-70>.

2. Манжула В., Файфура В. Моделювання поширення концентрації мікропластику у атмосфері для об'єктів сфери поводження з ТПВ. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”. 2025. № 1 (40). С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2025-1-40-60-69>.

3. Manzhula V., Dyvak M., Melnyk A., Faifura V., Momotiuk E. Identification of Models of Static Systems with Nonlinear Characteristics Based on Interval Data Analysis. International Journal of Computing. 2025. Vol. 24. No. 1. P. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3872>.

4. Tymchyshyn V., Melnyk A., Manzhula V., Faifura V., Romanets I., Tymchyshyn B. The System Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT. 2023. P. 58–62. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275416> (Scopus).

5. Tymchyshyn V., Melnyk A., Faifura V., Tymchyshyn B., Mazur I.-S., Honchar L. Data Management Service Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT. 2024. P. 678–682. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: розроблено процедури сервісу управління даними для мікросервісної архітектури).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712526>

6. Faifura V., Spivak I., Krepych S. Context-Aware Invasive Plant Instance Synthesis for UAV-Based Crop Field Image Augmentation. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT. 2023. P. 614–617. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275663> (Scopus).

7. Файфура В., Манжула В., Файфура В. Еколого-просторові аспекти забруднення території Тернопільської області мікропластичними масами. Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України. 2023. № 28. С. 59–71.

DOI: <https://doi.org/10.35774/rarrpsu2023.28.059>.

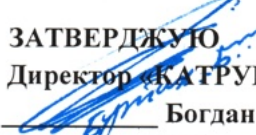
8. Faifura V., Bondar O., Faifura V. Ecological-Spatial Aspects of Pollution in the Region by Elastoplastic Micromasses. Економічний дискурс. 2024. № 1–2. С. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2024-1-5>.

9. Файфура В., Бицюра Л., Файфура В. Забруднення довкілля мікропластичними масами в контексті моделювання його просторового поширення. Освіта, наука, бізнес, енергетичні технології: сучасний стан, проблеми та перспективи: матеріали XIII Національної науково-практичної конференції. 2024. С. 76–78. <http://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/52354>.

10. Faifura V., Manzhula V., Tsiaputa A., Striletskyi M., Franko Y. Review of GIS Architecture for Environmental Monitoring: from Standalone Monoliths to AI-Ready Systems. CEUR Workshop Proceedings. 2023. Vol. 3974. P. 50–62. <https://ceur-ws.org/Vol-3974/paper05.pdf> (Scopus)

ДОДАТОК Д

АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор «КАТРУБ»

Богдан БУРТАК
28 квітня 2025 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Файфури Василя Васильовича
«Математичне та програмне забезпечення для моделювання
поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери»

У процесі оцінки та прогнозування впливу діяльності ПП «Катруб» (сміттепереробний завод, смт Микулинці, Тернопільський район) на стан навколишнього середовища, зокрема атмосферне повітря, використано результати дисертаційної роботи Файфури Василя Васильовича, присвяченої розробці та застосуванню комплексу методів моніторингу та моделювання перенесення мікропластику (МП) у приземному шарі атмосфери, а саме комбіновану методику ідентифікації МП у приземному шарі атмосфери, що поєднує польовий відбір проб завислих речовин у повітрі та подальший лабораторний аналіз, обмеженої вибірки, на основі якої встановлюється інтервальні оцінки вмісту МП у атмосфері; метод математичного моделювання та калібрування на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції, що враховує процеси перенесення МП повітряними потоками, турбулентне розсіювання, сухе та вологе осадження.

Зазначені методи, на відміну від існуючих, дозволяють ефективно здійснювати моніторинг та моделювання перенесення саме МП у приземному шарі атмосфери, що забезпечує кількісну оцінку просторово-часової динаміки розповсюдження МП навколо постійних джерел забруднення; оперативність отримання даних; можливість прогнозування зон підвищеного ризику забруднення.

За період з січня 2024 по грудень 2024 року розроблену методику та модель для оцінки забруднення було впроваджено на ПП «Катруб» для проведення щоквартального моніторингу викидів МП в атмосферне повітря та оцінки стану ґрунтів на прилеглій території, що забезпечено оперативне отримання даних моніторингу та скоротило час на прийняття рішень щодо забезпечення високого рівня екологічної безпеки.

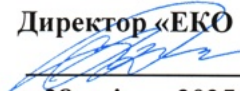
Відповідальний за впровадження,
начальник відділу екологічної безпеки
сміттепереробного заводу ПП «Катруб»



Б. М. Буртак

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор «ЕКО БАЛАНС ТЕР»

 **Олег ДУРНЯК**

28 квітня 2025 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
Файфури Василя Васильовича
«Математичне та програмне забезпечення для моделювання
поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери»**

Для оцінювання та прогнозування впливу діяльності ТОВ «ЕКО БАЛАНС ТЕР» (сміттесортувальне підприємство у с. Плебанівка Терехівської МТГ Тернопільського району) на стан довкілля загалом і атмосферного повітря зокрема було використано напрацювання дисертаційної роботи Файфури Василя Васильовича. Основою дослідження стала розроблена ним математична модель поширення мікропластику в зоні дії полігонів твердих побутових відходів, яка базується на методах моніторингу та моделювання процесів у приземному шарі атмосфери.

Для обґрунтування моделі на базі полігону ТПВ у с. Плебанівка було проведено апробацію комбінованої методики ідентифікації мікропластику в приземному шарі атмосфери та у звалищних фільтратах. Методика включала: польовий відбір проб завислих речовин у повітрі та лабораторні дослідження зразків. Математичне моделювання базувалося на основі рівняння адвекції-дифузії-реакції з урахуванням особливостей повітряного перенесення мікропластичних частинок.

Запровадження цієї моделі дозволило суттєво підвищити точність оцінки просторово-часового розподілу мікропластичних забруднень, оперативно виявляти зони ризику та приймати екологічно обґрунтовані рішення.

У період із січня 2024 року до грудня 2024 року запропоновану методику та модель було впроваджено на ТОВ «ЕКО БАЛАНС ТЕР» для проведення щоквартального моніторингу викидів мікропластичних мас в атмосферу та оцінки стану довкілля прилеглих територій. Це забезпечило своєчасне отримання результатів спостережень і дозволило суттєво скоротити час на прийняття рішень щодо підвищення рівня екологічної безпеки.

Відповідальний за впровадження,
начальник відділу екологічної безпеки
ТОВ «ЕКО БАЛАНС ТЕР»



 **О. П. Дурняк**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

46009, Україна, м. Тернопіль, вул. Львівська, буд. 5А, тел. (0352) 51-75-52

№ 21/ 61 - 2025

« 28 » 04 20 25 року

ДОВІДКА про участь в науково-дослідній роботі

Видана **ФАЙФУРІ Василеві Васильовичу** про те, що у 2025 році на посаді молодшого наукового співробітника він бере участь у виконанні молодіжного науково-дослідного дослідження (науково-технічна (експериментальна) розробка) на тему: «Математичне та програмне забезпечення прототипу біогазової установки з підвищеною ефективністю функціонування» (державний реєстраційний номер 0124U000076), яке здійснює Західноукраїнський національний університет у 2024-2025 роках за рахунок державного бюджету.

Начальник науково-дослідної частини



Віта СЕМАНЮК



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ІТЕСТ АЙТІ ІНКОРПОРЕЙТЕД ФОРТЕ ГРУП»

46008, м. Тернопіль, вулиця Торговиця 32а, тел. 0968037490
ЄДРПОУ 38910399
Р/р UA 32 322313 0000026006000020780 в Філія АТ Укресімбанк в м. Тернопіль
МФО 322313

№ 6

22 січня 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Файфури Василя Васильовича

«Математичне та програмне забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери»

Даний акт складений про те, що при реалізації програмних продуктів в ТОВ «ІАІ ФОРТЕ ГРУП» використано результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Файфури Василя Васильовича, а саме загальну архітектуру та підхід до реалізації програмно-технічних комплексів, які включають інтеграцію програмно-реалізованих засобів математичного моделювання та візуалізації із використанням ГІС технологій.

Розроблена архітектура включає необхідні модулі для інтеграції апаратних засобів, виконання складних обчислень, візуалізації результатів та коригування математичних моделей. Компанією були впроваджені елементи запропонованої архітектури в процес розробки програмних продуктів із інтеграцією апаратних засобів та підходи до моделювання і обробки даних, що дозволило підвищити ефективність розробки та супроводу програмного забезпечення.

Заступник директора



Христина ФЕДОРЧУК

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з навчально-методичної
роботи
Західноукраїнського національного
університету

Віктор ОСТРОВЕРХОВ

«10» квітня 2025 р.

АКТ

про впровадження в освітній процес Західноукраїнського національного
університету результатів дисертаційної роботи

Файфури Василя Васильовича

«Математичне та програмне забезпечення для моделювання поширення
мікропластику в приземному шарі атмосфери»

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи Файфури Василя Васильовича «Математичне та програмне забезпечення для моделювання поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери» використані в освітньому процесі факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету для здобувачів вищої освіти спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення».

При викладанні дисциплін «Архітектура та проектування програмного забезпечення» та «Технологія розробки програмного забезпечення та систем моделювання» розглядається архітектура програмної системи, яка, на відміну від існуючих, інтегрує модулі побудови математичних моделей поширення мікропластику в приземному шарі атмосфери на основі рівнянь адвекції-дифузії-реакції для різних видів джерел забруднення, що у сукупності спрощує використання даних ГІС для оцінки та прогнозування стану навколишнього середовища для об'єктів сфери поводження з ТПВ та дорожньої інфраструктури.

Декан факультету комп'ютерних
інформаційних технологій,
к.т.н., доцент

Ігор ЯКИМЕНКО

Завідувач кафедри комп'ютерних наук
д.т.н., професор

Андрій ПУКАС