

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Тимчишин Василь Степанович**

УДК 004.4:504.5:621.43.064

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**Методи та програмні засоби для моделювання забруднення  
грунтів шкідливими викидами у вихлопних газах  
автотранспорту**

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.С. Тимчишин.

Науковий керівник: Мельник Андрій Миколайович, доктор технічних наук, доцент

Тернопіль – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Тимчишин В.С.* Методи та програмні засоби для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2023.

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

Дисертаційна робота присвячена розв'язуванню актуального науково-технічного завдання розробки математичного та програмного забезпечення для моніторингу забруднення ґрунтів та ґрунтових вод шкідливими викидами автотранспорту, зокрема сполуками, які утворюються через дифузію та взаємодію із водою діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ).

Зростаюча кількість автомобілів на дорогах, особливо в мегаполісах, містах, та на їх околицях, що межують із сільськогосподарськими угіддями та рекреаційними зонами, призводить до значного викиду шкідливих речовин у повітря, а потім накопичення їх у ґрунті та ґрунтових водах. Ця проблема має декілька серйозних наслідків. По-перше, викиди автотранспорту містять такі шкідливі речовини, як діоксид азоту і окисли вуглицю, які можуть мігрувати у ґрунтові води через опади та інші атмосферні умови. Це може спричинити забруднення водних джерел і впливати на якість питної води.

По-друге, забруднення ґрунту та ґрунтових вод може мати серйозний вплив на здоров'я людей. Подальші процеси дифузії діоксиду азоту пов'язані із міграцією у ґрунтові води, перетворенням на азотну кислоту і вимиванням її солей у водойми, спричиняють насичення їх нітратами, які, як відомо, є надзвичайно шкідливими для людини та фауни. Підвищена концентрація цих шкідливих речовин, може призвести до отруєння, різних захворювань та навіть загрози життю. Крім того,

забруднення ґрунтів та ґрунтових вод може завдати шкоди екосистемам, порушити екологічний баланс та знизити якість ґрунтів для сільського господарства.

Вище зазначені проблеми вимагають постійного моніторингу забруднення ґрунтів на ґрунтових вод із використанням інформаційно-вимірювальних систем, вартість яких є надзвичайно високою. В той же час, моніторинг шкідливих викидів автотранспорту у повітря не є на сьогодні великою проблемою. Вартість таких інформаційно-вимірювальних систем є помірною та нескладною для реалізації з технічної та технологічної точки зору. Тому у дисертаційній роботі запропоновано математичне та програмне забезпечення для моніторингу забруднення ґрунтів та ґрунтових вод шкідливими викидами автотранспорту, через вимірювання концентрації діоксиду азоту у поверхневому шарі повітря і подальшого моделювання процесів його дифузії та взаємодії із водою у ґрунтах та ґрунтових водах.

У першому розділі проведено аналіз методів та програмних засобів для моніторингу забруднення довкілля.

Після дослідження різних методів для оцінки забруднення ґрунтів, було виявлено, що найпоширенішими методами є хімічний аналіз, біоіндикація, геофізичний підхід та математичне моделювання. При цьому встановлено, що саме математичне моделювання володіє численними перевагами і деякими недоліками порівняно з іншими методами. Цей метод дозволяє враховувати різноманітні фактори та їх взаємодію, що важливо для отримання більш точних результатів. Крім того, це дозволяє економити ресурси, оскільки не потребує великої кількості дорогоцінних реагентів чи біологічних організмів, як це властиво іншим методам.

Проведено аналіз засобів оцінювання рівня забруднення ґрунту, ґрунтових вод і атмосфери. У ході цього аналізу були розглянуті різні технічні пристрої, призначені для вимірювання концентрації діоксиду азоту в навколишньому середовищі. Представлено огляд переваг і недоліків цих систем. На підставі проведеного аналізу було визначено, що пристрій Hyper-local Air Quality Analyzer Sniffer4D є найкращим вибором для вимірювання забруднення, оскільки він

здатний проводити збір даних в приземному шарі атмосфери, не впливаючи на цілісність ґрунту.

У завершальній частині розділу, виходячи з актуальності проблеми моніторингу навколишнього середовища та після аналізу методів і інструментів для визначення рівня забруднення, сформовано завдання для досягнення цілей дисертаційного дослідження.

У другому розділі дисертаційної роботи розроблено математичне забезпечення для моделювання процесів, пов'язаних з викидами шкідливих речовин автотранспорту і їх впливом на навколишнє середовище.

Запропоновано та обґрунтовано метод математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на диференціальних рівняннях в частинних похідних із початковими умовами, заданими за результатами вимірювань концентрації забруднюючих речовин у газоподібному стані на поверхні ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів.

Набули подальшого розвитку математичні моделі розподілу концентрації сполук азотної кислоти та супутніх солей у ґрунтах у вигляді диференціальних рівнянь з розподіленими параметрами за початкових умов, визначених за результатами вимірювань у поверхневому шарі повітря.

Під час обчислень було побудовано розподіл концентрації забруднень в ґрунті та воді в околах окремих точок спостережень. Також побудовано розподіл концентрації забруднень в околах пари точок спостережень підсистем типу водойма-узбережжя. На основі даних, отриманих з мобільного вимірювального комплексу, де фіксувалися найвищі, найнижчі та середні значення концентрації забруднень у повітрі на низькій висоті, побудовано модель розподілу концентрації забруднень в ґрунті у місцях проведення вимірювань. Встановлено, що суттєве проникнення забруднень у газоподібному стані практично закінчується на глибині 10 сантиметрів.

В завершальній частині розділу було побудовано інтервальну модель для

оцінки фонових рівнів концентрацій діоксиду азоту. Для створення цієї моделі використано методи інтервального аналізу та еволютивні алгоритми, базовані на поведінкових моделях бджолоїної колонії. Цей підхід дозволив досягнути високої прогностичної точності, забезпечивши гарантовану точність отриманих моделей на рівні 15%.

У третьому розділі розроблено архітектуру програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує програмне забезпечення інформаційно-вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів. Система складається з чотирьох окремих модулів, які взаємодіють між собою за допомогою різних технологій. Блок Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer був обраний як базовий компонент для вимірювання концентрації діоксиду азоту в приземному шарі атмосфери. У цьому пристрої є спеціальний датчик для вимірювання даної речовини, а також він оснащений модулем телеметрії для зв'язку. Для полегшення обміну даними між датчиком і службою керування даними на комп'ютері встановлено програмне забезпечення Sniffer4D Mapper для забезпечення візуалізації результатів вимірювань у реальному часі.

Згідно розробленої архітектури, результати вимірювань передаються в підсистему для моделювання ґрунтів, де приводяться до інтервального вигляду через наявність похибок вимірювань та зберігаються в базі даних. В контексті розробки архітектури даної системи також набув подальшого розвитку програмно-технічний комплекс для моніторингу забруднення ґрунтів, який, на відміну від існуючих, забезпечує опосередковану оцінку концентрацій забруднюючих речовин у ґрунтах за результатами вимірювань концентрацій газоподібних шкідливих речовин на поверхні ґрунтів, що забезпечує зниження вартості процесів контролю забруднення ґрунтів.

За допомогою різних типів UML-діаграм, таких як діаграми активності, use-case діаграми, діаграми послідовності, діаграми діяльності, діаграми комунікації,

діаграми класів, діаграми компонентів та діаграми розгортання, були визначені основні вимоги до системи. Використання цього підходу дозволило покращити ефективність процесу розробки і використання математичних моделей разом із відповідними експериментальними даними для дослідження цього типу забруднення.

Система реалізована з використанням об'єктно-орієнтованого підходу програмування і ґрунтується на мікросервісній архітектурі, використовуючи технологію .Net Framework та мову програмування C#. Для зберігання і керування даними використано систему управління базами даних Microsoft SQL (MSSQL).

У четвертому розділі дисертаційної роботи наведено вигляд графічного інтерфейсу програмного забезпечення для моделювання забруднення ґрунтів, а також описано модулі цієї системи, з фокусом на їх взаємодії з різними категоріями користувачів та можливостями зовнішніх інтеграцій.

Для перевірки системи було проведено інтеграційне тестування та тестування продуктивності. Для проведення експертизи програмного інтерфейсу було виконано різні групи тестів, включаючи позитивні тести, розширені позитивні тести з додатковими параметрами, тести з негативними вхідними даними (включаючи валідні та невалідні дані), деструктивні тести, а також тести на безпеку та авторизацію. Для перевірки продуктивності було визначено основні сценарії, такі як логін користувача, експорт даних з мобільної станції, вибір місії, побудова ПРО, моделювання забруднення в ґрунті та у воді. За результатами проведеного тестування зовнішнього інтерфейсу всі 123 тести були успішно завершені без жодної помилки, підтверджуючи надійну роботу програми. Результати тестування продуктивності також підтвердили успішну роботу.

Після аналізу кількісних показників (аналітика та звітність, збір даних онлайн, підтримка додаткових параметрів, масштабованість, стійкість до зовнішніх факторів) оцінки систем моніторингу забруднення ґрунту розраховано інтегральний показник ефективності розробленої системи. Дана технологія відзначається значним покращенням цього показника ефективності у порівнянні з іншими відомими рішеннями у цій галузі, збільшуючи його на 42.0%. Ця цифра

вдвічі перевищує відносний ріст ефективності, який був зафіксований в існуючих системах моніторингу забруднення ґрунту.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні програмно-технічного комплексу для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

**Ключові слова:** математичне моделювання, екологічний моніторинг, шкідливі викиди автотранспорту, забруднення ґрунту та підземних вод, діоксид азоту, архітектура програмного забезпечення, програмний комплекс.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

1. Дивак М.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Порплиця Н.П., Войтюк І.Ф., Тимчишин В.С. Архітектура системи екологічного моніторингу та приклад її застосування для моделювання концентрацій шкідливих викидів автотранспорту // *Індуктивне моделювання складних систем: зб. наук. пр. Київ, 2017. Вип. 9. С. 69-84.*

*Здобувачем розроблено модуль збору даних для системи екологічного моніторингу навколишнього середовища.*

2. Dyvak M., Rot A., Pasichnyk R., Tymchyshyn V., Huliiev N., Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles // *Sustainability*. 2021. 13(5):2768. <https://doi.org/10.3390/su13052768>. (*Scopus, Web of Science, Q2*).

*Здобувачем запропоновано метод математичного моделювання процесів опосередкованої оцінки забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту та математичні моделі розподілу концентрації сполук азотної кислоти та супутніх солей у ґрунтах у вигляді диференціальних рівнянь з розподіленими параметрами за початкових умов.*

3. Дивак М. П., Манжула В. І., Мельник А. М., Тимчишин В. С. Система моніторингу забруднення повітря автотранспортом на базі автономного аеромобільного вимірювального комплексу // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 42(2). 2022. с.73–83. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2021-42-2-73-83>.

*Здобувачем розроблено архітектуру програмної системи екологічного моніторингу для вимірювання та прогнозування поширення концентрацій забруднюючих речовин, яка використовує програмне забезпечення зовнішнього інформаційно-вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів.*

4. Тимчишин В., Отоо Ф. Архітектура програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в ґрунтах та ґрунтових водах // *Вісник ХНУ: Технічні науки*. Вип № 2 (2023). 2023. с.351-360.

*Здобувачем удосконалено програмно-технічний комплекс для моніторингу забруднення ґрунтів, який дозволяє надавати оцінку концентрації забруднюючих речовин у ґрунтах на основі вимірювань концентрацій цих речовин у газах, які знаходяться на поверхні ґрунтів.*

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

5. Тимчишин В.С., Порплиця Н.П., Тимчишин Б.С. Програмний комплекс для моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в часі. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю АСІТ'2017*. – Тернопіль: ТНЕУ, 2017. с.233-234.

*Здобувачем розроблено архітектуру програмного комплексу для моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в часі.*



6. Tymchyshyn V., Porplytsya N., Melnyk A., Tymchyshyn B. Software for Modelling the Air Pollution by Vehicles. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018. pp. 207-210. (*Scopus*).

*Здобувачем створено програмне забезпечення для моделювання процесів забруднення повітря автотранспортом.*

7. Litvynchuk M., Spivak I., Krepych S., Spivak S., Krepych R. and Tymchyshyn V. "Approach to Evaluation the Functional Suitability of a Software System Using the Fuzzy Logic Mechanism," *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, Czech Republic. 2019. pp. 273-276. doi: 10.1109/ACITT.2019.8780000. (*Scopus*).

*Здобувачем запропоновано підхід до оцінки функціональної придатності програмної системи за допомогою механізму нечіткої логіки.*

8. Щур В. В., Тимчишин В.С., Ковбасистий А. В., Лопусевич В. П. Математичне та програмне забезпечення інтеграції даних інформаційних систем. *Матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів «Комп'ютерні інформаційні технології» СІТ'2019, 29 листопада 2019р., Тернопіль.* 2019. ст. 54-55.

*Здобувачем запропоновано алгоритм інтеграції даних інформаційних систем на основі результатів порівняння концептів, їх атрибутів і відносин між концептами.*

9. Мельник А.М., Тимчишин В.С., Ковбасистий А.В., Романюк М.В. Математичне та програмне забезпечення управління реплікаціями в базах даних типу NoSQL. *Матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів «Комп'ютерні інформаційні технології» СІТ'2019, 29 листопада 2019р., Тернопіль.* 2019. с. 24.

*Здобувачем розроблено модуль управління реплікаціями в базах даних типу NoSQL.*

10. Dyvak M., Melnyk A., Kovbasisty A., Shevchuk R., Huhul O. and Tymchyshyn V. "Mathematical Modeling of the Estimation Process of Functioning Efficiency Level of Information Web-Resources," *2020 10th International Conference*

*on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany. 2020. pp. 492-496. doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208846. (**Scopus**).

*Здобувачем розроблено модуль оцінювання процесу рівня ефективності функціонування інформаційних веб-ресурсів.*

11. Dyvak M., Rot A., Tymchyshyn V., Valchyshyn S., Otoo F. and Hernes M. "Hardware Components of the Monitoring System of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions From Vehicles," *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany. 2021. pp. 608-612, doi: 10.1109/ACIT52158.2021. (**Scopus**).

*Здобувачем описано апаратні компоненти системи моніторингу забруднення ґрунтів та підземних вод шкідливими викидами автотранспорту.*

12. Tymchyshyn V., Otoo F., Komar M., Shpak V., Semaniuk V. and Fronchko V. "Model of an Autonomous Airmobile Complex for Measuring Air Pollution Concentrations by Vehicles," *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ruzomberok, Slovakia. 2022. pp. 423-427. doi: 10.1109/ACIT54803.2022.991316. (**Scopus**).

*Здобувачем описано інтелектуальний модуль для зарядки квадрокоптера DJI Matrix на базі аеромобільного комплексу для моніторингу забруднення навколишнього середовища.*

## ANNOTATION

Tymchyshyn V.S. Methods and software tools for modeling soil contamination by harmful emissions in the exhaust gases of the motor vehicle. – Scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 121 "Software Engineering" - Western Ukrainian National University, Ternopil, 2023.

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

The dissertation is dedicated to solving a current scientific and technical problem related to the development of mathematical and software tools for monitoring soil and groundwater pollution by harmful emissions from automotive transport, particularly compounds formed through diffusion and interaction with water of nitrogen dioxide( $\text{NO}_2$ ).

The increasing number of vehicles on the roads, especially in megacities, cities, and their outskirts bordering agricultural lands and recreational areas, leads to significant emissions of harmful substances into the air, followed by their accumulation in the soil and groundwater. This problem has several serious consequences. Firstly, vehicle emissions contain harmful substances such as nitrogen dioxide and carbon oxides, which can migrate into groundwater through precipitation and other atmospheric conditions. This can lead to water source pollution and affect the quality of drinking water.

Secondly, soil and groundwater pollution can have a significant impact on human health. Further processes of nitrogen dioxide diffusion are associated with migration into groundwater, transformation into nitric acid, and the leaching of its salts into water bodies, resulting in their saturation with nitrates. Nitrates are known to be extremely harmful to humans and wildlife. Elevated concentrations of these harmful substances can lead to poisoning, various illnesses, and even life-threatening conditions. Additionally, soil and groundwater pollution can harm ecosystems, disrupt the ecological balance, and reduce soil quality for agriculture.

The above-mentioned issues require continuous monitoring of soil and groundwater pollution using information-measuring systems, the cost of which is extremely high. At the same time, monitoring harmful emissions from automotive transport into the air is not a significant problem today. The cost of such information-measuring systems is moderate and relatively easy to implement from a technical and technological perspective. Therefore, the dissertation proposes mathematical and software tools for monitoring soil and groundwater pollution by harmful emissions from automotive transport by measuring the concentration of nitrogen dioxide in the surface layer of the air and subsequently modeling the processes of its diffusion and interaction with water in soils and groundwater.

The first chapter involves an analysis of methods and software tools for environmental pollution monitoring.

After investigating various methods for assessing soil pollution, it was found that the most common methods include chemical analysis, bioindication, geophysical approaches, and mathematical modeling. It was established that mathematical modeling, in particular, has numerous advantages and some disadvantages compared to other methods. This method allows for the consideration of various factors and their interactions, which is important for obtaining more accurate results. Additionally, it enables resource savings since it does not require a large quantity of expensive reagents or biological organisms, as is the case with other methods.

An analysis of tools for assessing the level of soil, groundwater, and atmospheric pollution was conducted. During this analysis, various technical devices designed for measuring the concentration of nitrogen dioxide in the environment were examined. An overview of the advantages and disadvantages of these systems was presented. Based on the conducted analysis, it was determined that the Hyper-local Air Quality Analyzer Sniffer4D device is the best choice for pollution measurement since it is capable of collecting data in the near-surface atmospheric layer without impacting the integrity of the soil.

In the concluding part of the chapter, considering the relevance of environmental monitoring issues and after analyzing the methods and tools for determining pollution

levels, tasks were formulated to achieve the goals of the dissertation research.

In the second chapter of the dissertation, mathematical software was developed for modeling processes related to emissions of harmful substances from automotive transport and their impact on the environment.

A method for mathematical modeling of soil pollution processes by harmful emissions from vehicle exhaust gases has been proposed and justified. Unlike existing methods, this approach is based on partial differential equations with initial conditions, determined by the results of measuring the concentration of pollutants in gaseous state at the soil surface. This approach collectively simplifies the modeling processes of soil pollution.

Mathematical models for the distribution of the concentration of nitrogen compounds and associated salts in soils have further evolved in the form of differential equations with distributed parameters, with initial conditions determined based on measurements in the surface layer of the air.

During the calculations, concentration distribution profiles of pollutants in the soil and water were constructed around specific observation points. Concentration distribution profiles were also created around pairs of observation points for subsystems like water bodies and shorelines. Based on data obtained from a mobile measuring complex that recorded the highest, lowest, and average pollutant concentration values at low altitudes, a model of pollutant concentration distribution in the soil at measurement locations was developed. It was determined that significant penetration of pollutants in gaseous form practically ceases at a depth of 10 centimeters.

In the concluding part of this section, an interval model was constructed to estimate background levels of nitrogen dioxide concentrations. To create this model, interval analysis methods and evolutionary algorithms based on behavioral models of bee colonies were used. This approach enabled achieving high predictive accuracy, ensuring a guaranteed model accuracy level of 15%.

In the third chapter, an architecture for a software system for modeling soil pollution processes by harmful emissions from vehicle exhaust gases was developed. Unlike existing systems, this architecture integrates the software of the information-

measuring complex and tools for displaying the current situation regarding soil pollution, collectively simplifying the modeling processes. The system consists of four separate modules that interact with each other using various technologies. The Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer was chosen as the base component for measuring the concentration of nitrogen dioxide in the near-surface layer of the atmosphere. This device is equipped with a specialized sensor for measuring this substance and has telemetry capabilities for communication. To facilitate data exchange between the sensor and the data management service on the computer, the Sniffer4D Mapper software was installed to provide real-time visualization of measurement results.

According to the developed architecture, measurement results are transmitted to the subsystem for modeling soils, where they are converted into interval form to account for measurement errors and stored in a database. In the context of developing the architecture of this system, the software and hardware complex for monitoring soil pollution also saw further development. Unlike existing systems, it provides an indirect estimation of pollutant concentrations in soils based on measurements of gaseous pollutant concentrations on the soil surface. This reduces the cost of soil pollution control processes.

Using various types of UML diagrams, such as activity diagrams, use-case diagrams, sequence diagrams, activity diagrams, communication diagrams, class diagrams, component diagrams, and deployment diagrams, the main requirements for the system were determined. Employing this approach improved the efficiency of the development process and the utilization of mathematical models in conjunction with relevant experimental data for the study of this type of pollution.

The system is implemented using an object-oriented programming approach and is based on a microservices architecture, utilizing the .Net Framework technology and the C# programming language. For data storage and management, Microsoft SQL (MSSQL) database management system is employed.

In the fourth chapter of the dissertation, the graphical user interface of the software for modeling soil pollution is presented, along with a description of the modules of this system. The emphasis is placed on their interaction with various user categories and

external integration capabilities.

Integration testing and performance testing were conducted to verify the system. Various groups of tests were performed to assess the software interface, including positive tests, extended positive tests with additional parameters, tests with negative input data (including valid and invalid data), destructive tests, as well as security and authorization tests. Performance testing focused on determining key scenarios such as user login, data export from the mobile station, mission selection, IDO construction, soil and water pollution modeling. As a result of the external interface testing, all 123 tests were successfully completed without any errors, confirming the reliable operation of the software. The performance testing results also confirmed successful operation.

After analyzing quantitative indicators (analytics and reporting, online data collection, support for additional parameters, scalability, resistance to external factors), the integral efficiency indicator of the developed monitoring system for soil pollution was calculated. This technology is noted for a significant improvement in this efficiency indicator compared to other known solutions in this field, increasing it by 42.0%. This figure is twice the relative growth in efficiency recorded in existing soil pollution monitoring systems.

The practical significance of the obtained results lies in the creation of a software and hardware complex for modeling soil pollution by harmful emissions from vehicle exhaust gases.

Keywords: mathematical modeling, ecological monitoring, harmful emissions from vehicles, soil and groundwater contamination, nitrogen dioxide, software architecture, software complex.

## **PUBLICATION LIST BY THE DISSERTATION SUBJECT**

*Publications in which the main scientific results of the dissertation has been published:*

1. Dyvak M.P., Masliyak Yu.B., Pukas A.V., Porplytsya N.P., Voitiuk I.F., Tymchyshyn V.S. Architecture of the ecological monitoring system and an example of

its application for modeling concentrations of harmful emissions from motor transport.// *Inductive modeling of complex systems: Coll. Science. pr. - K .: ISTC ITS NAS and MES of Ukraine, 2017. Issue 9. pp. 69-84.*

*The acquirer has developed a data collection module for the environmental monitoring system.*

2. Dyvak M., Rot A., Pasichnyk R., Tymchyshyn V., Huliiev N., Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles // *Sustainability*. 2021. 13(5):2768. <https://doi.org/10.3390/su13052768>. (*Scopus, Web of Science, Q2*).

*The acquirer has proposed a method of mathematical modeling of the processes of indirect assessment of soil pollution by harmful emissions of vehicle exhaust gases and mathematical models of the distribution of the concentration of nitric acid compounds and associated salts in soils in the form of differential equations with distributed parameters under initial conditions.*

3. Dyvak M.P., Manzhula V.I., Melnyk A. M., Tymchyshyn V. S. A system for monitoring air pollution by motor vehicles based on an autonomous air-mobile measuring complex // *Optical-electronic information and energy technologies*. №42. Issue 2. 2022. pp. 73–83. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2021-42-2-73-83>.

*The acquirer has developed the architecture of the environmental monitoring software system for measuring and forecasting the spread of pollutant concentrations, which uses the software of the external information and measurement complex and means of displaying the current situation regarding soil pollution.*

4. Tymchyshyn V., Otoo F. Architecture of a software system for soil pollution processes modeling as a result of diffusion of nitrogen dioxide in soils and groundwater // *Visnyk KhNU: Technical Sciences*. Volume №2 (2023). 2023. pp. 351-360.

*The acquirer has improved the software and technical complex for monitoring soil pollution, which allows to provide an estimate of the concentration of pollutants in soils based on measurements of the concentrations of these substances in gases that are on the soil surface.*



*Publications certifying the approbation of the dissertation materials:*

5. Tymchyshyn V.S., Porplytsya N.P., Tymchyshyn B.S. A software complex for modeling atmospheric pollution by harmful vehicle emissions over time. *Modern computer information technologies: Materials of the All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students of ACIT' 2017 Ternopil*. 2017. pp.233-234.

*The acquirer has developed the architecture of the software complex for modeling atmospheric pollution by harmful emissions of motor vehicles over time.*

6. Tymchyshyn V., Porplytsya N., Melnyk A., Tymchyshyn B. Software for Modelling the Air Pollution by Vehicles. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018. pp. 207-210. (**Scopus**).

*The acquirer has created software for modeling the processes of air pollution by motor vehicles.*

7. Litvynchuk M., Spivak I., Krepych S., Spivak S., Krepych R. and Tymchyshyn V. "Approach to Evaluation the Functional Suitability of a Software System Using the Fuzzy Logic Mechanism," *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, Czech Republic. 2019. pp. 273-276. doi: 10.1109/ACITT.2019.8780000. (**Scopus**).

*The acquirer proposed an approach to assessing the functional suitability of the software system using a fuzzy logic mechanism.*

8. Shchur V. V., Tymchyshyn V.S., Kovbasisty A. V., Lopusevich V. P. Mathematical and software integration of data information systems. *Materials of the school-seminar of young scientists and students "Computer information technologies" CIT'2019, November 29, 2019. Ternopil*. 2019. pp.54-55.

*The acquirer proposed an algorithm for integrating data from information systems based on the results of comparing concepts, their attributes, and relationships between concepts.*

9. Melnyk A.V., Tymchyshyn V.S., Kovbasistii A.V., Romanyuk M.V. Mathematical and software management of replications in NoSQL databases. *Materials*

of the school-seminar of young scientists and students "Computer information technologies" CIT'2019, November 29, 2019. Ternopil. 2019. p24.

*The acquirer has developed a replication management module in NoSQL databases.*

10. Dyvak M., Melnyk A., Kovbasisty A., Shevchuk R., Huhul O. and Tymchyshyn V. "Mathematical Modeling of the Estimation Process of Functioning Efficiency Level of Information Web-Resources," *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany. 2020. pp. 492-496. doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208846. (**Scopus**).

*The acquirer has developed a process evaluation module for the level of effectiveness of the functioning of informational web resources.*

11. Dyvak M., Rot A., Tymchyshyn V., Valchyshyn S., Otoo F. and Hernes M. "Hardware Components of the Monitoring System of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions From Vehicles," *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany. 2021. pp. 608-612, doi: 10.1109/ACIT52158.2021. (**Scopus**).

*The acquirer described the hardware components of the soil and groundwater pollution monitoring system by harmful emissions from motor vehicles.*

12. Tymchyshyn V., Otoo F., Komar M., Shpak V., Semaniuk V. and Fronchko V. "Model of an Autonomous Airmobile Complex for Measuring Air Pollution Concentrations by Vehicles," *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ruzomberok, Slovakia. 2022. pp. 423-427. doi: 10.1109/ACIT54803.2022.991316. (**Scopus**).

*The acquirer described an intelligent module for charging the DJI Matrix quadcopter based on an air vehicle complex for monitoring environmental pollution.*

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ.....	31
1.1 Проблема забруднення шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту та її моніторинг .....	31
1.2 Аналіз методів оцінювання рівня забруднення ґрунтів.....	39
1.3 Аналіз засобів оцінювання рівня забруднення ґрунтів.....	47
1.4 Постановка задачі .....	56
Висновки до розділу 1 .....	59
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ .....	61
2.1 Математична модель дифузії концентрації шкідливих викидів автотранспорту в ґрунтах.....	62
2.2 Математичні моделі динаміки шкідливих викидів автотранспорту в атмосферу .....	73
2.3 Моделі концентрацій фонових рівнів забруднення навколишнього середовища автотранспортом .....	87
Висновки до розділу 2 .....	98
РОЗДІЛ 3 АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ У ВИХЛОПНИХ ГАЗАХ АВТОТРАНСПОРТУ .....	100
3.1 Підсистема вимірювань концентрації шкідливих викидів автотранспорту .	100
3.2 Архітектура програмної системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.....	108
3.3 Проєктування та реалізація підсистеми аналізу та зберігання інформації...	120
3.4 Особливості розгортання та налаштування системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту .....	133
Висновки до розділу 3 .....	135

РОЗДІЛ 4 ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАСПОРТУ	137
4.1 Організація графічного інтерфейсу .....	137
4.2 Тестування програмної системи.....	147
4.3 Ефективність системи .....	153
Висновки до розділу 4 .....	164
ВИСНОВКИ.....	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	168
ДОДАТОК А DDL БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ У ВИХЛОПНИХ ҐАЗАХ АВТОТРАСПОРТУ.....	183
ДОДАТОК Б ЛІСТИНГ КОДУ ОСНОВНИХ МОДУЛІВ ПРОГРАМИ .....	188
ДОДАТОК В СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ .....	196
ДОДАТОК Ґ АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	198

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДДМ – дискретна динамічна модель

ІРО – інтервальний різницевий оператор

ІСНАР – інтервальна система нелінійних алгебричних рівнянь

ПМБК – поведінкові моделі бджолоїної колонії

MVC – Model View Control

СУБД – система управління базами даних

DDL – Data Definition Language

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Питання оцінки та прогнозування забруднення навколишнього середовища є надзвичайно важливим через його далекосяжні наслідки як для екосистеми планети, так і для сталого розвитку людства. Забруднення атмосферного повітря, води, ґрунту чи шумове забруднення становить серйозну загрозу для екосистем, біорізноманіття та природних ресурсів. Це призводить до погіршення якості повітря, забруднення водойм, руйнування ареалів існування та порушення крихкого екологічного балансу. Крім того, забруднення навколишнього середовища тісно пов'язане з проблемами громадського здоров'я, спричиняючи респіраторні захворювання, рак та інші захворювання серед населення. Оскільки забруднення виходить за межі географічних і політичних кордонів, воно вимагає колективних глобальних дій, з метою пом'якшення його наслідків та розробки дорожніх карт для сталого розвитку та екологічної безпеки на Землі.

Моніторинг забруднення навколишнього середовища має вирішальне значення для екологічної безпеки нашої планети та її мешканців. Перш за все, він служить системою раннього попередження, яка дає нам змогу визначити й оцінити ступінь забруднення різних екосистем. Постійний контроль якості повітря, води, ґрунтів та інших компонентів навколишнього середовища, уможливорює виявлення негативної динаміки рівнів забруднення та вживання своєчасних та ефективних заходів для пом'якшення їх негативного впливу. Це особливо важливо, враховуючи величезну кількість забруднюючих речовин, які потрапляють у навколишнє середовище через промислові процеси, транспорт та іншу діяльність людини. Моніторинг забезпечує необхідні дані для розуміння масштабів забруднення та прийняття обґрунтованих рішень щодо управління ресурсами та заходів контролю забруднення.

На теперішній час для моніторингу якості повітря розроблено велику кількість інформаційних систем та напрацьовано велику кількість моделей. В той же час, для моделювання забруднення ґрунтів переважно використовують

лабораторні дослідження, що ускладнює оперативний моніторинг саме забруднення шкідливими викидами ґрунтів.

Питання дослідження забруднення ґрунтів через вплив атмосферного повітря розглядалися в роботах Дивака М.П., Юрченко В.А., Михайлової Л.С., Беспалової М.В., Beaulieu, D., Stettler, M. E., Tsao, C. C., в яких наведено математичні моделі та принципи моніторингу забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту. В працях цих дослідників описано основні задачі прикладних систем моніторингу, зокрема, прогнозування забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту з використанням математичних моделей у вигляді різницевих операторів. Для їх побудови використано методи структурно-параметричної ідентифікації на основі аналізу інтервальних даних. Проте досить обмежена увага була приділена моніторингу забруднень ґрунтів та водойм. Зазвичай розглядається індиректне забруднення ґрунтів, спричинене осіданням забруднених частинок з атмосферних опадів. У цьому контексті часто ігнорується можливість забруднення ґрунтів та водойм шкідливими речовинами, які виділяються у вихлопних газах автотранспорту.

Забруднення ґрунту та ґрунтових вод може мати серйозний вплив на здоров'я людей. Подальші процеси дифузії діоксиду азоту пов'язані із міграцією у ґрунтові води, перетворенням на азотну кислоту і вимиванням її солей у водойми, спричиняють насичення їх нітратами, які, як відомо, є надзвичайно шкідливими для людини та фауни. Підвищена концентрація цих шкідливих речовин, може призвести до отруєння, різних захворювань та навіть загрози життю. Крім того, забруднення ґрунтів та ґрунтових вод може завдати шкоди екосистемам, порушити екологічний баланс та знизити якість ґрунтів для сільського господарства.

Вище зазначені проблеми вимагають постійного моніторингу забруднення ґрунтів на ґрунтових вод із використанням інформаційно-вимірювальних систем, вартість яких є надзвичайно високою. В той же час, моніторинг шкідливих викидів автотранспорту у повітря не є на сьогодні великою проблемою. Вартість таких інформаційно-вимірювальних систем є помірною та нескладною для реалізації з технічної та технологічної точки зору. Саме тому є актуальною розробка

математичного та програмного забезпечення для моніторингу забруднення ґрунтів та ґрунтових вод шкідливими викидами автотранспорту, через вимірювання концентрації діоксиду азоту у поверхневому шарі повітря і подальшого моделювання процесів його дифузії та взаємодії із водою у ґрунтах та ґрунтових водах.

**Мета і завдання дослідження.** Підвищення ефективності та спрощення процедур моделювання процесів забруднення ґрунтів внаслідок шкідливих викидів автотранспорту за рахунок розробки математичного та програмного забезпечення для моніторингу забруднення ґрунтів та ґрунтових вод шкідливими викидами автотранспорту, зокрема сполуками, які утворюються через дифузії та взаємодію із водою діоксиду азоту.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати методи та програмні засоби для моніторингу забруднення довкілля;
- обґрунтувати та розробити метод математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту;
- розробити математичні моделі розподілу концентрації сполук азотної кислоти та її супутніх солей у ґрунтах на основі вимірювання діоксиду азоту в приземному шарі атмосфери;
- розробити архітектуру програмної системи математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів, яка інтегрує програмне забезпечення інформаційно-вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів;
- провести апробацію розроблених методів і математичних моделей.

*Об'єкт дослідження* – процеси забруднення ґрунтів шкідливими викидами автотранспорту.

*Предмет дослідження* – методи та програмні засоби для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

**Методи дослідження.** При проведенні досліджень використано такі методи:



методи теорії систем та інтервального аналізу – для моделювання та прогнозування поширення концентрацій шкідливих викидів, використано математичні моделі динаміки поширення концентрацій забруднень внаслідок шкідливих викидів у вихлопних газах автотранспорту у вигляді різницевих рівнянь, що є аналогами диференціальних рівнянь в частинних похідних, методи обчислювальної математики – для побудови і розв’язання рівнянь дифузії в ґрунті та ґрунтових водах, які являють собою окремий вид диференціального рівняння в частинних похідних. Методи об’єктно-орієнтованої парадигми програмування та методи теорії алгоритмів для побудови мікросервісної архітектури та реалізації програмного забезпечення.

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

- запропоновано та обґрунтовано метод математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на диференціальних рівняннях в частинних похідних із початковими умовами, заданими за результатами вимірювань концентрацій забруднюючих речовин у газоподібному стані на поверхні ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів;

- розроблено архітектуру програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує програмне забезпечення інформаційно-вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів.

*Набули подальшого розвитку:*

- програмно-технічні комплекси та технології для моніторингу забруднення ґрунтів, які, на відміну від існуючих, забезпечують опосередковану оцінку концентрацій забруднюючих речовин у ґрунтах за результатами вимірювань концентрацій газоподібних шкідливих речовин на поверхні ґрунтів, що забезпечує

зниження вартості процесів контролю забруднення ґрунтів;

- математичні моделі розподілу концентрації сполук азотної кислоти та супутніх солей у ґрунтах у вигляді диференціальних рівнянь з розподіленими параметрами за початкових умов, визначених за результатами вимірювань концентрацій діоксиду азоту у вихлопних газах автотранспорту.

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

- [93] запропоновано метод математичного моделювання процесів опосередкованої оцінки забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту та математичні моделі розподілу концентрації сполук азотної кислоти та супутніх солей у ґрунтах у вигляді диференціальних рівнянь з розподіленими параметрами за початкових умов;
- [97] розроблено модуль збору даних для системи екологічного моніторингу навколишнього середовища;
- [106] розроблено архітектуру програмної системи екологічного моніторингу для вимірювання та прогнозування поширення концентрацій забруднюючих речовин, яка використовує програмне забезпечення зовнішнього інформаційно-вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів;
- [111] розроблено архітектуру програмного комплексу для моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в часі;
- [112] створено програмне забезпечення для моделювання процесів забруднення повітря автотранспортом;
- [113] удосконалено програмно-технічний комплекс для моніторингу забруднення ґрунтів, який дозволяє надавати оцінку концентрації забруднюючих речовин у ґрунтах на основі вимірювань концентрацій цих речовин у газах, які знаходяться на поверхні ґрунтів.
- [124] описано апаратні компоненти системи моніторингу забруднення ґрунтів та підземних вод шкідливими викидами автотранспорту;

- [125] описано інтелектуальний модуль для зарядки квадрокоптера DJI Matrix на базі аеромобільного комплексу для моніторингу забруднення навколишнього середовища;
- [126] запропоновано підхід до оцінки функціональної придатності програмної системи за допомогою механізму нечіткої логіки;
- [127] запропоновано алгоритм інтеграції даних інформаційних систем на основі результатів порівняння концептів, їх атрибутів і відносин між концептами;
- [128] розроблено модуль управління реплікаціями в базах даних типу NoSQL;
- [129] розроблено модуль оцінювання процесу рівня ефективності функціонування інформаційних веб-ресурсів.

Основні положення та результати дисертаційної роботи в наведених працях викладені в повному обсязі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи презентовано на 7 конференціях, зокрема:

- Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» ACIT'2017 – Тернопіль – 2017;
- 8th International Conference on “Advanced Computer Information Technologies” ACIT'2018 – Ceske Budejovice, Czech Republic – 2018;
- 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT) – Ceske Budejovice, Czech Republic – 2019;
- Школа-семінар молодих вчених і студентів «Комп'ютерні інформаційні технології» CIT'2019, 29 листопада 2019р., Тернопіль;
- 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT) – Deggendorf, Germany – 2020;
- 11th International Conference on Advanced Computer Information, ACIT-2021, Deggendorf, Germany, 15-17 Sept, 2021;
- 12th International Conference on Advanced Computer Information, ACIT-2022, Catholic University in Ruzomberok, Slovakia, 26-28 Sept, 2022.

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 12 наукових праць (Додаток В) загальним обсягом 78 сторінок, зокрема 4 статті у фахових наукових виданнях [2] [8] [11] [12], 1 з яких входить до міжнародної наукометричної бази Scopus та Web of Science та відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank віднесено до квартилю Q2 [8], 8 публікацій у матеріалах конференцій [1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10], 5 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus [3, 4, 7, 9, 10].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 146 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 201 сторінку друкарського тексту, з них 166 сторінок основного тексту. Робота містить 67 рисунків і 7 таблиць.

**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 держбюджетною тематикою кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету. Основні результати дисертаційного дослідження отримано в межах виконання таких тем:

- держбюджетного прикладного дослідження на тему: «Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод» (державний реєстраційний номер 0120U102040), у якій автором запропоновано метод математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на диференціальних рівняннях в частинних похідних із початковими умовами, заданими за результатами вимірювань концентрації забруднюючих речовин у газоподібному стані на поверхні ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів;

- науково-технічної (експериментальної) розробки на тему: «Методи, засоби та інформаційна технологія ідентифікації джерел забруднень приземистого шару атмосфери на основі їх математичних моделей» (державний реєстраційний номер 0120U100880), у якій автором розроблено архітектуру програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує програмне забезпечення інформаційно-вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів;
- держбюджетного дослідження на тему: «Розробка методів та алгоритмів захищеного зберігання даних» (державний реєстраційний номер 0121U114705), у якій автором розроблено програмно-технічний комплекс для моніторингу забруднення ґрунтів, який, на відміну від існуючих, забезпечує опосередковану оцінку концентрацій забруднюючих речовин у ґрунтах за результатами вимірювань концентрацій газоподібних шкідливих речовин на поверхні ґрунтів, що забезпечує зниження вартості процесів контролю забруднення ґрунтів;
- госпдоговірною темою «Онлайн система «Терногаз»» (державний реєстраційний номер 0119U102841, замовник – ТзОВ «Терногаз»), у якій автором запропоновано підхід до оцінки функціональної придатності програмної системи за допомогою механізму нечіткої логіки.

Усі вищезгадані роботи виконувалися за безпосередньої участі автора.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у створенні програмної системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту. Архітектура програмного забезпечення включає необхідні модулі для введення початкових умов моделювання, виконання обчислень, візуалізації результатів та можливості внесення коректив в математичні моделі.

Теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи використано:

- у державній установі «Тернопільський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» при удосконаленні системи контролю та моніторингу ґрунтів та ґрунтових вод у Тернопільській області (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 23 серпня 2023 р);

- в НДЧ ЗУНУ при виконанні держбюджетних прикладних досліджень на тему:

- «Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод» (державний реєстраційний номер 0120U102040);
- Методи, засоби та інформаційна технологія ідентифікації джерел забруднень приземистого шару атмосфери на основі їх математичних моделей» (державний реєстраційний номер 0120U100880);
- «Розробка методів та алгоритмів захищеного зберігання даних» (державний реєстраційний номер 0121U114705).
- «Онлайн система «Терногаз»» (державний реєстраційний номер 0119U102841, замовник – ТзОВ «Терногаз»).

(акт про використання результатів дисертаційної роботи від 5 вересня 2023 р.);

- в ІТ компанії «Forte Group», при розробці програмно-технічних комплексів, які інтегрують апаратні та програмні компоненти реалізовані в різнорідних середовищах, (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 10 травня 2023 р);

- в освітньому процесі Західноукраїнського національного університету на кафедрі комп'ютерних наук при викладанні дисциплін: «Конструювання програмного забезпечення», «Якість програмного забезпечення та тестування», «Архітектура та проектування програмного забезпечення (акт про впровадження в навчальний процес від 7 вересня 2023 р.)

У додатку Г до дисертації подано акти використання результатів дисертаційного дослідження.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

Забруднення довкілля стає все більшою проблемою у світі, і ефективний моніторинг є важливим інструментом для виявлення, контролю та управління негативними впливами на навколишнє середовище. Ефективна система спостереження є критичним інструментом для розуміння рівня забруднення та його джерел. Завдяки такому моніторингу відповідальні установи та організації можуть спостерігати за тенденціями і організувати належні заходи для захисту навколишнього середовища. У розділі описано проблему забруднення довкілля шкідливими речовинами, зокрема діоксидом азоту, та особливості її моніторингу. Аналізуються методи та програмні засоби, що застосовуються для спостереження за забрудненням довкілля.

Проводиться детальний огляд різних методів моніторингу. Представлені методи аналізуються з точки зору їх ефективності, точності, складності впровадження та вартості. Також розглядаються переваги та недоліки кожного методу з метою розуміння їхнього потенціалу у різних ситуаціях та умовах.

Крім того, здійснюється огляд різних інструментів, які використовуються для обробки та аналізу даних з моніторингу забруднення довкілля. Представлені засоби включають в себе системи збору даних, аналітичні інструменти, візуалізацію даних та інші функції, спрямовані на покращення розуміння стану довкілля та прийняття обґрунтованих рішень з питань екологічного управління.

На основі аналізу ставляться відповідні завдання для вирішення задач та досягнення мети дисертаційного дослідження.

#### **1.1 Проблема забруднення шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту та її моніторинг**

Зростання кількості власників транспортних засобів у всьому світі призвело до збільшення обсягів руху на дорогах і пов'язаних з ним забруднюючих речовин

у повітрі. Рух транспортних засобів і покриття доріг є одними з найважливіших джерел забруднювачів навколишнього середовища, особливо міського, і може мати значний вплив на здоров'я людини та стан екосистеми. Дослідження підтвердили вразливість населення, яке проживає поблизу місць з інтенсивним рухом транспорту, особливо людей похилого віку на збудники забруднення[1-3]. Не менше занепокоєння викликає поглинання шкідливих видів рослинами поблизу доріг. Дорожнє покриття також виступає в якості сховища для забруднювачів з інших джерел, які можуть реагувати з забруднювачами, які утворюються внаслідок руху, що призводить до змін характеристик забруднювачів, впливаючи на їх розчинність, реакційну здатність, біодоступність, мобільність, токсичність і стійкість. Забруднюючі речовини, що осідають на поверхні доріг, містяться в дорожньому пилу. Основними джерелами забруднювачів транспорту є викиди вихлопних газів, витоки палива та системи змащення, спрацювання компонентів, таких як шини, гальма та шасі, а також руйнування дорожнього покриття. Фактори руху та дорожнього покриття відіграють значну роль у впливі на тип, кількість та швидкість утворення забруднюючих речовин. Також було встановлено, що затори є більш значущими, ніж інтенсивність руху, з точки зору утворення забруднюючих речовин[4-8]. Викиди речовин від транспортних засобів великої вантажопідйомності, що працюють на дизельному паливі, відрізняються від викидів легких автомобілів, які працюють на бензині. Дуже широкий діапазон слідів металів і вуглеводнів потрапляє в навколишнє середовище в результаті згоряння палива та зношування компонентів автомобіля та дорожнього покриття[9]. Метали, які найчастіше утворюються внаслідок транспортної діяльності, вміщують Cd, Cu, Cr, Ni та Zn. Pb додається до дорожніх поверхонь через накопичення в ґрунті в минулому використання етилованого палива, а також через зношення компонентів транспортних засобів і дорожньої фарби. Серед вуглеводнів найбільше занепокоєння викликають поліциклічні ароматичні вуглеводні, оскільки ці сполуки представляють значний клас імовірних канцерогенів. Відпрацьоване мастило та неповне згоряння вичопного палива, зокрема дизельного, є значними джерелами поліциклічних ароматичних



вуглеводнів у навколишньому середовищі. Існує гіпотеза, що зміни кліматичних характеристик, вплинуть на зміни у накопиченні забруднюючих речовин транспорту на поверхнях землі та змиванні дощовими стоками[10-12].

Короткострокові наслідки, які є тимчасовими, вміщують такі захворювання, як пневмонія або бронхіт, а також певний дискомфорт (подрознення носа, горла, очей або шкіри). Забруднене повітря також може викликати головний біль, запаморочення та нудоту. Неприємні запахи, які створюють заводи, сміття чи каналізаційні системи, також вважаються забрудненням повітря.

Довгостроковий вплив забруднення повітря може тривати роками або все життя, воно може призвести навіть до смерті людини. Довгострокові наслідки забруднення повітря сприяють розвитку хвороби серця, раку легенів і респіраторних захворювань, таких, як емфізема. Забруднення повітря також може завдати довгострокової шкоди нервам, мозку, ниркам, печінці та іншим органам людей. Деякі вчені підозрюють, що забруднювачі повітря спричиняють вроджені дефекти[13-15]. Майже 2,5 мільйони людей щороку помирають у світі від наслідків забруднення повітря на вулиці чи всередині приміщень. Азот, як компонент, потрібен для багатьох біомолекул, таких як білки, ДНК і хлорофіл. На жаль, поширений у природі динітроген ( $N_2$ ) є хімічно інертним, що робить його недоступним для більшості організмів. У результаті, азот повинен пройти через різні перетворення у своєму життєвому циклі, перш ніж первинні виробники зможуть його поглинати. Основними процесами перетворення є азотфіксація та амоніфікація, нітрифікація та денітрифікація. Ці процеси дозволяють існування азоту як в органічній (наприклад, аміно- та нуклеїнові кислоти), так і в неорганічній (наприклад, аміак, нітрати) формах. Різні мікроорганізми в біосфері, такі як бактерії, археї та гриби, також допомагають цим змінам.

На кругообіг азоту істотно впливає діяльність людини. Кількість біологічно доступного азоту в системі може зрости внаслідок спалювання викопного палива, застосування азотних добрив та інших видів діяльності. Значні зміни в доступності азоту можуть спричинити серйозні зміни в його циклі у водних і наземних екосистемах, оскільки доступність азоту зазвичай, обмежує первинну

продуктивність багатьох екосистем. Дослідження показують, що діяльність людини та індустріалізація збільшили фіксацію азоту експоненціальною швидкістю з 1980-х років [16-18]. На рисунку 1.1 зображено забруднення діоксидом азоту ґрунтів та ґрунтових вод.

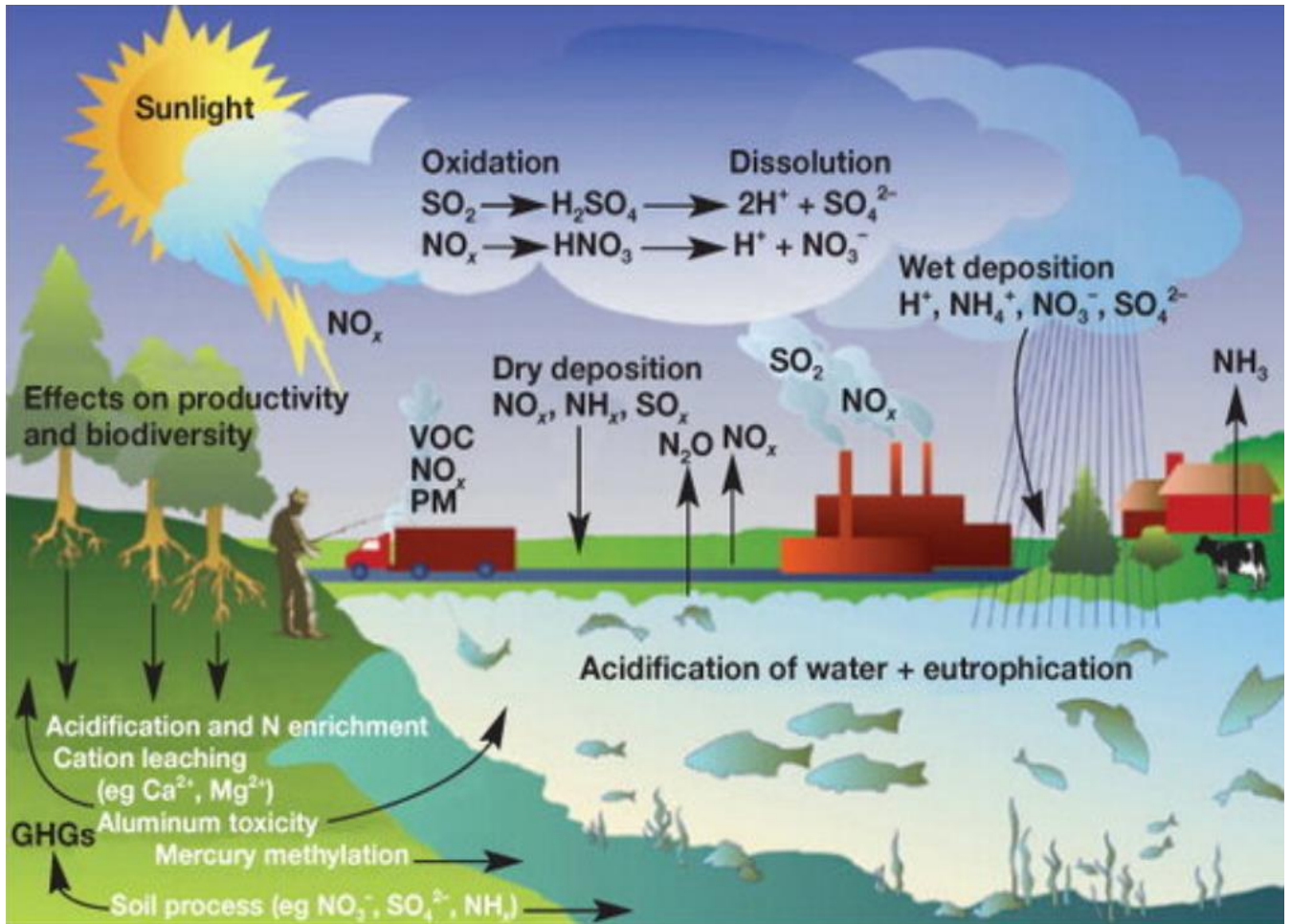


Рис. 1.1 – Забруднення діоксидом азоту ґрунтів та ґрунтових вод [19]

Наслідки надлишку азоту різноманітні: від евтрофікації наземних і водних систем до глобального підкислення та втрати озону в стратосфері. Надлишок азоту в ґрунті переноситься поверхневим стоком і водою, що рухається через землю. Згодом він потрапляє у воду та інші екосистеми, які також можуть отримувати азот з опадів. За допомогою цих механізмів азот потрапляє в поверхневі водойми, змінюючи природу та прискорюючи її старіння або евтрофікацію, прискорюючи ріст водоростей і водних рослин. Оскільки ці водні організми гинуть і розкладаються, це викликає проблеми та знижує вміст кисню у воді.

Оскільки чисельність населення, промислова діяльність і споживання енергії продовжують зростати, безперервна розробка програм і пристроїв автоматизованого моніторингу має вирішальне значення для підвищення точності звітів про стан навколишнього середовища та економічної ефективності процесу його моніторингу [20,21].

Посилення тенденцій технологічного розвитку та його впливу на навколишнє середовище вимагає кращого розуміння взаємозв'язку між елементами в ньому. Короткочасні та довгострокові модифікації навколишнього середовища, викликані такими змінами, повинні бути зафіксовані перед тим, як можна буде виконати будь-який процес аналізу. Моніторинг і реєстрація великих часових рядів даних і надання їх доступності для вивчення — ключові ролі систем моніторингу довкілля. Можливість зберігати незмінну та надійну інформацію про параметри, що контролюються, становить велику проблему, яку необхідно вирішити[22-24].

Збір даних у реальному часі в різних середовищах відкриває новий погляд на науковий аналіз. Незалежно від того, чи використовуються вони для кращого розуміння життєвого середовища чи для прогнозування й попередження про потенційну небезпеку, приймаються відповідні рішення. Досліджуються аспекти систем моніторингу навколишнього середовища[25-29] . Щоразу, коли є віддалені місця, для передачі даних використовуються різні радіотехнології, наприклад стандарти GSM і бездротового зв'язку. Зазвичай місця моніторингу не мають постійного джерела живлення, яке можна було б використовувати для сенсорних вузлів. У таких випадках або в разі підвищеної надійності в якості основного або резервного джерела живлення використовується батарея. Радіопристрої, такі як модем GSM або радіоадаптер Wi-Fi, можуть по-різному впливати на енергоспоживання. Середовище моніторингу може потребувати певного розміщення датчика та вимог до зв'язку. Недавні дослідження представляють різні топології, що використовуються в бездротових сенсорних мережах, такі як шина, дерево, зірка, кільце, сітка, круг і сітка. Коли дані успішно зібрані та оброблені, інформацію, отриману від датчиків систем моніторингу навколишнього середовища, можна використовувати в різних сферах, наприклад, для оповіщення

про лісову пожежу або для виявлення забруднення повітря . Він може надавати атмосферні дані на місці з більш високою просторовою та часовою щільністю, контролювати NO<sub>2</sub> за допомогою недисперсійного інфрачервоного датчика або якість води в поверхневих прісних водоймах. Його використання не обмежується лише площами над рівнем землі. Системи застосовуються для моніторингу вугільних шахт і водних додатків, також для моніторингу навколишнього середовища, підводного дослідження, запобігання катастрофам, тактичне спостереження та інше. Розгортання апаратного забезпечення, керованого спеціально розробленим програмним забезпеченням, роль якого в автоматизованому зборі даних, допомагає краще зрозуміти навколишнє середовище. Недорогі реєстратори даних все частіше використовуються для різних сфер збору даних, що у режимі реального часу має важливе значення у різних сферах, таких як збір інформації про погоду, гідрологічний аналіз, оцінка після катастроф та інше.

Існує три основні типи моніторингу навколишнього середовища - це ґрунт, атмосфера та вода. Деякі методи сканування та моніторингу вміщують фільтрацію, седиментацію, електростатичні проби, імпінгери, абсорбцію, конденсацію, відбір проб із захвату та відбір композитних проб[30-34].

Дані, зібрані за допомогою цих методів, можуть бути введені в сховища даних, де їх можна класифікувати, аналізувати, візуалізувати та зробити практичні висновки, які сприятимуть прийняттю обґрунтованих рішень.

Моніторинг води: методи відбору проб навколишнього середовища вміщують оціночне, просте випадкове, стратифіковане, систематичне та сіткове, адаптивне кластерне, захоплення та пасивне; напівбезперервний і безперервний екологічний моніторинг дистанційне зондування та моніторинг навколишнього середовища; і біомоніторинг використовуються для вимірювання та моніторингу діапазонів біологічних, хімічних, радіологічних, мікробіологічних і популяційних параметрів.

Моніторингом екологічного стану води керують державні та місцеві установи, університети та волонтери, і він має вирішальне значення для

характеристики вод, визначення ефективності існуючих програм контролю забруднення, визначення тенденцій і нових проблем, перенаправлення зусиль із контролю забруднення за потреби, і в зусиллях з реагування на надзвичайні ситуації.

Моніторинг повітря: дані про навколишнє середовище, зібрані за допомогою спеціалізованих інструментів спостереження, таких як мережі датчиків і моделі географічної інформаційної системи (ГІС), з багатьох різних екологічних мереж та інститутів, інтегруються в моделі розсіювання повітря, які поєднують викиди, метеорологічні та топографічні дані для виявлення та прогнозування концентрацій забруднювачів повітря. Нижче наведено методології вимірювання забруднення

Моніторинг ґрунту: відбір проб (окремих проб) і комплексних проб (кілька проб) використовуються для моніторингу ґрунту, встановлення базових ліній і виявлення загроз, таких як підкислення, втрата біорізноманіття, ущільнення, забруднення, ерозія, втрата органічних матеріалів, засолення та нестабільність схилів. Розрізняють такі аспекти моніторингу ґрунту:

- моніторинг солоності: дистанційне зондування, ГІС та електромагнітна індукція використовуються для моніторингу солоності ґрунту, яка, якщо її незбалансовано, може спричинити шкідливий вплив на якість води, інфраструктуру та врожайність рослин;
- моніторинг забруднення: хімічні методи, такі як хроматографія та спектрометрія, використовують для вимірювання токсичних елементів, таких як ядерні відходи, вугільна зола, мікропластик, нафтохімія та кислотні дощі, які можуть призвести до розвитку захворювань у людей і тварин, які перебувають у зоні забруднення;
- моніторинг ерозії: складний процес, у якому точні прогнози майже неможливі для великих територій. Універсальне рівняння втрат ґрунту найчастіше використовується для прогнозування його втрат внаслідок водної ерозії, яка може бути спричинена такими факторами, як кількість опадів, поверхневий стік, річки, струмки, повені, вітер, рух мас, клімат, склад і структура ґрунту, рельєф і відсутність управління рослинністю.

Застосування різних методів моніторингу ґрунтів залежить не тільки від хімічних властивостей забруднюючих речовин, але й від причини проведення моніторингу. Іноді вивчення продуктивності ґрунту необхідне для встановлення відносних концентрацій забруднюючих речовин або їхніх груп. У інших випадках, моніторинг вимагається згідно з місцевими або національними правилами, а дослідження слід проводити в сертифікованих аналітичних лабораторіях.

Інший вид моніторингу здійснюється для відстеження ступеня природного забруднення або самоочищення забруднених ґрунтів у результаті хімічних, біологічних і фізичних процесів у навколишньому середовищі. Кожен із цих типів спостереження вимагає різного рівня аналітичної точності з точки зору рівня визначення, розділення та ідентифікації конкретних хімічних забруднювачів у ґрунтах. Крім того, важливими факторами при визначенні використовуваних методів є вартість, надійність вимірювання та легкість аналізу[35-38].

Основна складність моніторингу ґрунтів пов'язана з характером ґрунтової матриці. Концентрацію забруднюючих речовин у воді та атмосфері зазвичай виміряти легше, ніж у ґрунті. Це значною мірою пов'язано з взаємодією забруднюючих речовин із самими частинками ґрунту під впливом сильних хімічних і фізичних сил. Таким чином, якщо методика моніторингу вимагає вилучення або видалення хімічних речовин із ґрунту перед аналізом, ефективність процесу вилучення набуває вирішального значення для загального успіху дослідження[39-42].

Ще одна проблема – доступ до забруднених ґрунтів. Забруднювачі ґрунту з часом мігрують і стають менш доступними. Крім того, забруднюючі речовини можуть потрапляти безпосередньо в більш глибокі горизонти, де глибина забруднених ґрунтів також змінює методи моніторингу.

Найкращими методами є ті, які не порушують цілісності ґрунту, є недорогими та відносно легкими у виконанні за допомогою інструментів для відбору проб на землі. Однак, як правило, надійність інформації та складність аналізу можуть бути пов'язані між собою, тобто чим надійнішим і складнішим є аналіз, тим складнішим, трудомістким і дорожчим. Основним завданням у сфері

моніторингу ґрунтів є забезпечення надійних методів, які вимагають використання відносно недорогого вимірювального обладнання та мінімального навчання персоналу.

Деякі методи моніторингу використовуються вже кілька десятиліть. Часто це передові методи аналітичної хімії, які адаптовані для аналізу ґрунтів або розроблені спеціально для моніторингу ґрунтів у місці забруднення. Традиційно відстеження забруднення ґрунту передбачає збір зразка та відправлення його в лабораторію для визначення неорганічних і органічних забруднюючих речовин. Для цього необхідно вилучити такі речовини з ґрунту. Після екстракції застосовуються такі аналітичні методи, як газова хроматографія, мас-спектрометрія, атомно-абсорбційна спектроскопія, флуоресцентна спектроскопія та інфрачервона магнітно-резонансна (МРТ) спектроскопія. В інших випадках, лабораторний апарат модифікований і портативний, що дозволяє проводити аналіз відразу після взяття проби. Набори для тестування на місці та польові інструменти, як правило, менші, їх легко транспортувати та вони більш стійкі до стирання, транспортування та інших форм фізичного навантаження, ніж лабораторні прилади.

## **1.2 Аналіз методів оцінювання рівня забруднення ґрунтів**

Оцінка рівня забруднення ґрунту є важливим кроком в управлінні забрудненими ділянками та прийнятті відповідних рішень. Існує кілька методів оцінки забруднення ґрунту, кожен із яких має свої сильні та слабкі сторони. Ось деякі з найбільш часто використовуваних:

- хімічний;
- біоіндикація;
- геофізичний;
- математичне моделювання.

Розглянемо кожний метод детальніше. Хімічний аналіз є найбільш поширеним методом оцінки забруднення ґрунту[43-46], що передбачає збір зразків ґрунту та їх аналіз на наявність забруднюючих речовин за допомогою таких

лабораторних методів як газова хромато-мас-спектрометрія (ГХ-МС) або високоефективна рідинна хроматографія (ВЕРХ). Він може ідентифікувати конкретні забруднення та їх концентрації, що корисно для визначення ступеня забруднення та розробки відповідних стратегій відновлення[47-49]. Однак хімічний аналіз займає багато часу та коштів, і він може виявити не всі забруднювачі, особливо з низькими концентраціями.

Переваги методу:

- забезпечує точні та надійні результати: є високоточним і точним методом оцінки забруднення ґрунту. Він може надати детальну інформацію про тип і концентрацію забруднень, присутніх у ґрунті.
- може ідентифікувати конкретні забруднювачі та їх концентрації: може ідентифікувати конкретні забруднювачі, присутні в ґрунті, що корисно для визначення ступеня забруднення та розробки відповідних стратегій відновлення.
- може використовуватися для оцінки ефективності зусиль з відновлення: може бути використаний для моніторингу ефективності зусиль з відновлення шляхом порівняння концентрацій забруднюючих речовин до та після обробки.

Недоліки методу:

- трудомісткий і дорогий: це трудомісткий і дорогий метод, який вимагає збору зразків ґрунту та їх аналізу в лабораторії за допомогою спеціального обладнання.
- потрібен навчений персонал і спеціалізоване обладнання: газова хромато-мас-спектрометрія (ГХ-МС) або високоефективна рідинна хроматографія (ВЕРХ), що може бути дорогим.
- може виявити не всі забруднювачі, особливо з низькими концентраціями: хімічний аналіз може виявити не всі забруднювачі, особливо з низькими концентраціями, які можуть бути присутніми в слідових кількостях.

Наступним методом є біоіндикація. Цей метод використовує живі організми



для визначення рівня забруднення ґрунту. Живі організми, такі як рослини, мікроорганізми та деякі види комах, можуть дати інформацію про забруднення ґрунту, в залежності від їх здатності акумулювати токсичні речовини. Для цього використовуються спеціальні рослини-індикатори, які реагують на наявність певних забруднюючих речовин у ґрунті[50-52]. Наприклад, рослини можуть змінювати колір листя, або їх зростання може бути гальмованим у забрудненому ґрунті.

Переваги методу:

- може надати інформацію про токсичність забруднюючих речовин для живих організмів: за допомогою біологічних аналізів можна визначити токсичність забруднюючих речовин для живих організмів, що є корисним для оцінки потенційних екологічних ризиків і ризиків для здоров'я людини, пов'язаних із забрудненням ґрунту.
- може використовуватися для оцінки ефективності зусиль з відновлення: за допомогою біологічних аналізів можна оцінити ефективність зусиль з відновлення шляхом порівняння токсичності зразків ґрунту до та після обробки.
- може бути економічно ефективнішим і практичнішим, ніж хімічний аналіз: біологічні аналізи не потребують спеціального обладнання чи навченого персоналу.

Недоліки методу:

- може бути неспецифічним для забруднюючих речовин, що цікавлять. Біологічні аналізи можуть бути неспецифічними для забруднюючих речовин, що цікавлять, і можуть виявити загальну токсичність, що може ускладнити ідентифікацію конкретних забруднюючих речовин, відповідальних за токсичність.
- на біологічні аналізи можуть впливати інші фактори навколишнього середовища, окрім забруднення, такі як рН, температура та тип ґрунту, що може вплинути на результати та призвести до неточних оцінок забруднення ґрунту.

- може не бути широко прийнятим регуляторними органами: біологічні аналізи можуть не бути прийнятими регуляторними органами як стандартний метод оцінки забруднення ґрунту, оскільки все ще ведуться дебати щодо їх надійності та точності.

Геофізичний метод можна використовувати для картографування надр і виявлення зон забруднення ґрунту. Він є неінвазивним і швидко охоплює великі території, що корисно для виявлення зон потенційного забруднення та визначення пріоритетності місць відбору проб для хімічного аналізу[53-55].

Переваги методу:

- швидко охоплює великі території, що корисно для визначення зон потенційного забруднення.
- виявляє зони забруднення ґрунту без буріння чи розкопок, що заощаджує час і зменшує витрати на дослідження місця.
- надає інформацію про структуру та геологію надр, які можуть допомогти визначити зони потенційного забруднення та скерувати стратегії відновлення.

Недоліки методу:

- геофізичний метод може бути не в змозі ідентифікувати конкретні забруднювачі та їх концентрації, що обмежить їхню корисність у розробці стратегій відновлення.
- потребує спеціального досвіду та обладнання, наприклад георадарних (GPR) і датчиків електромагнітної індукції (EMI), які можуть бути дорогими та вимагати навчання для роботи.
- може давати хибнопозитивні або хибнонегативні результати, що може призвести до неточних оцінок забруднення ґрунту. На точність методу можуть впливати такі фактори, як вологість ґрунту, текстура ґрунту та наявність інших підповерхневих особливостей.

Методи оцінювання рівня забруднення ґрунтів на основі математичних моделей базуються на статистичних, геостатистичних та математичних підходах. Ці методи дозволяють прогнозувати рівень забруднення ґрунтів за допомогою

різних показників, таких як вміст різних забруднюючих речовин, їхній тип та розмірний склад, а також геологічні та кліматичні характеристики території[56-60].

Математичне моделювання, яке засноване на використанні математичних алгоритмів для аналізу та передбачення рівня забруднення ґрунтів, дозволяє проводити більш точну оцінку забруднення та здійснювати прогнозування його розвитку в часі. Оцінка рівня забруднення ґрунтів на основі математичних моделей має свої переваги і недоліки.

#### Переваги:

- об'єктивність. Математичні моделі дають можливість оцінити ступінь забруднення ґрунтів на основі точних кількісних показників і даних, що робить процес оцінки більш об'єктивним та науково-обґрунтованим.
- ефективність використання моделей дозволяє швидко та ефективно оцінити ступінь забруднення ґрунтів, в порівнянні зі стандартними методами дослідження ґрунтів.
- економія ресурсів. Математичні моделі дають можливість зменшити витрати на проведення реальних досліджень та аналізів, що є значним плюсом у відношенні до фізичних методів досліджень.

#### Недоліки:

- висока складність. Розробка та використання математичних моделей потребує спеціальних знань та вмінь у галузі математики, статистики та інших наук, що може зробити цей метод більш складним для більшості користувачів.
- відсутність універсальності. Математичні моделі, розроблені на основі конкретних даних та умов можуть ускладнювати їх використання у різних географічних та кліматичних умовах.

В таблиці 1.1 наведено короткий опис вищезгаданих методів.

Таблиця 1.1

## Методи оцінювання рівня забруднення ґрунтів

	Переваги	Недоліки
Хімічний аналіз	<ul style="list-style-type: none"> <li>- точні та надійні результати</li> <li>- ідентифікація конкретного забруднювача</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- трудомісткий і дорогий</li> <li>- потрібен навчений персонал і спеціалізоване обладнання</li> </ul>
Біоіндикація	<ul style="list-style-type: none"> <li>- надає інформацію про токсичність забруднюючих речовин</li> <li>- надає інформацію про токсичність забруднюючих речовин</li> <li>- потенційно виявляє забруднення, що не виявлені хімічним аналізом</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- може бути неспецифічним для забруднюючих речовин</li> <li>- на біологічні аналізи можуть впливати інші фактори навколишнього середовища</li> <li>- Недостатня чутливість до низьких рівнів забруднення</li> </ul>
Геофізичний метод	<ul style="list-style-type: none"> <li>- швидко охоплює великі території</li> <li>- виявляє зони забруднення ґрунту без буріння чи розкопок</li> <li>- надає інформацію про структуру та геологію надр</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- не вдасться ідентифікувати конкретні забруднювачі</li> <li>- потрібні спеціальні знання та обладнання</li> <li>- може давати хибнопозитивні або хибнонегативні результати</li> </ul>
Математичне моделювання	<ul style="list-style-type: none"> <li>- об'єктивність</li> <li>- ефективність</li> <li>- точність</li> <li>- економія ресурсів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- висока складність</li> <li>- відсутність універсальності</li> </ul>

Як видно з таблиці 1.1 методи оцінювання рівня забруднення ґрунтів на основі математичних моделей є ефективними інструментами для здійснення їх екологічної оцінки, а також для прийняття рішень щодо їхнього відновлення та

охорони. Існує ряд моделей, проблемою яких є складність задання початкових умов[61,62]. Для цього потрібно виконати забір та аналіз ґрунтів, що триває довший час. Запропонована система дозволяє точно виміряти концентрацію шкідливих речовин в поверхневому шарі та їхнє розподілення по висоті. Після цього буде можливо побудувати модель, виходячи з вимірювань, які зроблено в приземистому шарі атмосфери.

Вибір моделі залежить від конкретного місця та цілей оцінки. Комбінація моделей може знадобитися для отримання повної картини забруднення та визначення відповідних стратегій відновлення[63,64].

Математичні моделі концентрації діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ) у ґрунті зазвичай передбачають прогнозування концентрації  $\text{NO}_2$  у ґрунті на основі різних факторів навколишнього середовища, таких як концентрація  $\text{NO}_2$  в атмосфері, характеристики ґрунту (наприклад, рН, вміст органічної речовини) та землекористування. Нижче наведено приклади математичних моделей, які використовуються в контексті концентрації  $\text{NO}_2$  у ґрунті:

Модель дисперсії Гауса. Ця модель, зазвичай, використовується для прогнозування концентрації атмосферних забруднювачів, включаючи  $\text{NO}_2$ , у певній точці за вітром від джерела. У випадку концентрації  $\text{NO}_2$  у ґрунті, цю модель можна використовувати для прогнозування концентрації  $\text{NO}_2$  в атмосфері, яка буде осідати на ґрунт. Враховуючи швидкість осадження та характеристики ґрунту (наприклад, структуру ґрунту, вміст органічної речовини), модель може оцінити кінцеву концентрацію  $\text{NO}_2$  у ґрунті.

Модель хімічної рівноваги. Ця модель розглядає хімічні реакції, що відбуваються в ґрунті між  $\text{NO}_2$  та іншими компонентами ґрунту, наприклад водою, органічними речовинами, мінералами. Враховуючи концентрацію цих компонентів і кінетику реакції, ця модель може передбачити концентрацію  $\text{NO}_2$  у ґрунті.

Модель «Джерело-рецептор». Ця модель передбачає концентрацію  $\text{NO}_2$  у ґрунті на основі викидів  $\text{NO}_2$  із найближчих джерел і відстані між джерелами та рецептором, тобто ґрунтом. Враховуючи дисперсію  $\text{NO}_2$  в атмосфері та швидкість осадження на поверхні, модель може оцінити кінцеву концентрацію  $\text{NO}_2$  у ґрунті.

Статистичні моделі. Статистичні моделі можна розробити для аналізу великих наборів даних вимірювань концентрації  $\text{NO}_2$  у ґрунті та факторів навколишнього середовища. Вони можуть ідентифікувати екологічні фактори, які найбільше пов'язані з концентрацією  $\text{NO}_2$  у ґрунті, і прогнозувати концентрацію на їх основі. Наприклад, можна розробити регресійну модель для прогнозування концентрації  $\text{NO}_2$  у ґрунті на основі концентрації  $\text{NO}_2$  в атмосфері, рН ґрунту та землекористування.

Модель дифузії. Може бути використана для прогнозу концентрації діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ) у ґрунті. Дана модель враховує процес перенесення речовини через ґрун. Вона припускає, що концентрація  $\text{NO}_2$  в ґрунті змінюється внаслідок дифузії речовин з вищих до нижчих концентраційних зон.

Усі моделі мають свої обмеження та недоліки. Якщо говорити про перші три, то тут слід відмітити:

- Складність моделювання: Деякі з цих моделей, наприклад, гідродинамічні, можуть бути складними в реалізації та вимагати значних обчислювальних ресурсів. Розрахунки на їхній основі можуть бути часомісткими та вимагати значних знань та навичок у чисельних методах.
- Залежність від параметрів: Деякі можуть містити параметри, які потребують калібрування на основі експериментальних даних. Неправильна калібрування може призводити до неточних або неправильних прогнозів. Крім того, значення деяких параметрів можуть змінюватися в залежності від умов ґрунту, що ускладнює їх точне визначення.
- Неврахування геологічних та геоморфологічних особливостей: Математичні моделі можуть не втратити геологічні та геоморфологічні особливості ґрунту, такі як наявність пористих шарів, глибина ґрунтових вод, структура ґрунту та інші фактори, які можуть впливати на розподіл та перенос  $\text{NO}_2$  у ґрунті. Це може привести до неточностей у прогнозах.

Водночас модель дифузії має такі переваги:

- Простота: модель є досить простою, її можна легко використовувати для оцінки різних чинників на концентрацію діоксиду азоту.

- Універсальність: може бути використана для прогнозування концентрації діоксиду азоту в різних типах середовища, включаючи повітря, ґрунт та воду.
- Гнучкість: легко модифікується для врахування різних чинників, таких як температура, вологість, швидкість вітру та інші.

### 1.3 Аналіз засобів оцінювання рівня забруднення ґрунтів

Рівень забруднення  $\text{NO}_2$  може бути оцінений за допомогою різних інструментів, таких як моніторингові станції, дистанційне зондування тощо.

Для вимірювання концентрацій діоксиду азоту в ґрунті широко використовується лабораторія iCAP RQ ICP-MS. На рисунку 1.2 зображено загальний вигляд даної станції.

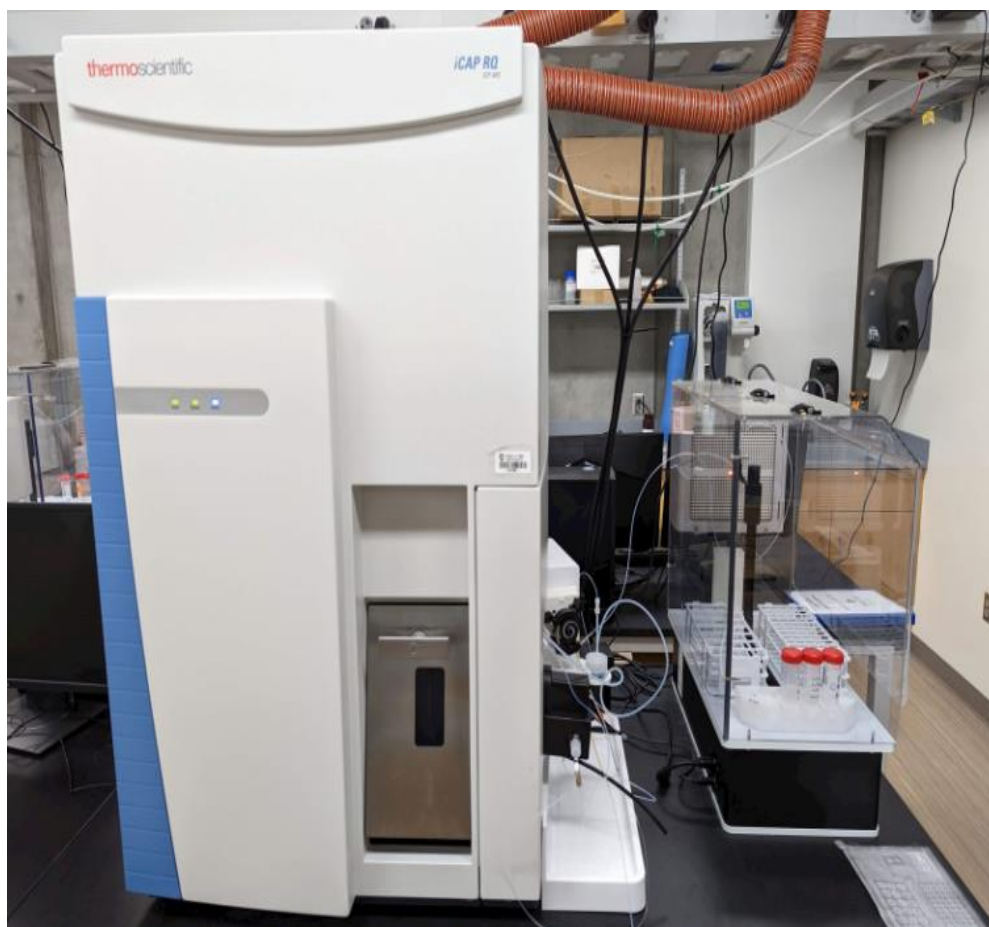


Рис. 1.2 – Лабораторія iCAP RQ ICP-MS[65]

Система iCAP RQ ICP-MS — це тип аналітичного приладу, який використовується для аналізу мікроелементів. Він заснований на принципі мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою, яка є потужною технікою для вимірювання мікроелементів у різноманітних зразках, враховуючи екологічні, геологічні, біологічні та промислові зразки[66].

iCAP RQ ICP-MS виробляється Thermo Fisher Scientific і призначена для високопродуктивного аналізу мікроелементів у складних матрицях. Він оснащений квадрупольним мас-спектрометром, який може виявляти та кількісно визначати елементи від літію (Li) до урану (U) з відносно високою чутливістю. Лабораторія використовує ефективну систему введення зразків, яка може обробляти як рідкі, так і тверді зразки. Рідкі зразки, зазвичай, вводять у плазму за допомогою небулайзера та розпилювальної камери, тоді як тверді зразки за допомогою лазерної абляції. Лабораторія також містить ряд програмних інструментів, які дозволяють користувачам оптимізувати свої методи аналізу, виконувати перевірки контролю якості та створювати звіти. Вона також має можливість виконувати аналіз ізотопного співвідношення, що корисно для геохімічних і екологічних досліджень[67].

Вимірювання  $\text{NO}_2$  за допомогою системи iCAP RQ ICP-MS вимагає підготовки зразків і спеціальних методів аналізу. Ось загальний огляд конкретних кроків:

Підготовка зразка: вимірювання  $\text{NO}_2$  за допомогою лабораторії iCAP RQ ICP-MS вимагає перетворення  $\text{NO}_2$  на NO (оксид азоту) за допомогою реакції відновлення. Зазвичай, це робиться за допомогою відновника такого як хлорид ванадію (II) ( $\text{VCl}_2$ ) або йодид натрію (NaI). Реакцію відновлення проводять у реакційній ємності, яку нагрівають до певної температури для оптимізації ефективності реакції.

Аналіз: коли  $\text{NO}_2$  перетворюється на NO, він вводиться в систему iCAP RQ ICP-MS за допомогою системи введення зразка, спеціально розробленої для газофазного аналізу. Газ NO вводиться в плазму за допомогою системи введення газу, а потім іонізується та аналізується за допомогою мас-спектрометра. Система



iCAP RQ ICP-MS використовує відношення маси до заряду ( $m/z$ ) 30 для виявлення NO, який має характерний ізотопний малюнок, який використовується для точного кількісного визначення.

Калібрування: для забезпечення точних вимірювань систему iCAP RQ ICP-MS необхідно відкалібрувати за допомогою сертифікованих еталонних матеріалів (CRM), які містять відомі концентрації NO<sub>2</sub>. Калібрувальна крива створюється з використанням серії стандартних розчинів із відомими концентраціями NO<sub>2</sub>, які потім аналізуються за допомогою того самого методу, що й зразки.

Таким чином, вимірювання NO<sub>2</sub> за допомогою системи iCAP RQ ICP-MS передбачає перетворення NO<sub>2</sub> в NO за допомогою відновника, введення газу NO в систему за допомогою системи введення газу та калібрування системи за допомогою CRM з відомими концентраціями NO<sub>2</sub>.

Щоб виміряти концентрацію діоксиду азоту в ґрунтових водах, часто використовують спектрофотометр Hach DR6000. Це прилад лабораторного рівня, який використовується для аналізу різних параметрів у пробах води та стічних вод. Це високоточний і надійний прилад, який може вимірювати абсорбцію, пропускання, концентрацію та кінетику, має діапазон довжин хвиль від 190 до 1100 нм і точність довжини хвилі  $\pm 1$  нм. Пристрій оснащений великим, легким для читання кольоровим сенсорним дисплеєм, інтуїтивно зрозумілим і зручним для користувача.

Спектрофотометр Hach DR6000 має кілька функцій, які роблять його популярним вибором серед лабораторій якості води. Вони вміщують автоматичний вибір довжини хвилі, який дозволяє приладу визначати оптимальну довжину хвилі для даного аналізу, забезпечуючи точні та відтворювані результати. Пристрій також має кілька режимів вимірювання, що робить його універсальним і придатним для широкого спектру аналізів. Інструмент Hach DR6000 має вбудовані можливості керування даними, що дозволяє користувачам зберігати та отримувати доступ до даних безпосередньо на пристрої. Він може зберігати до 500 програм користувача та має ємність пам'яті до 2000 результатів. Також має порт USB для передачі даних і може бути підключений до мережі для віддаленого моніторингу та

керування.

Nach DR6000 є точним і надійним інструментом для вимірювання концентрації нітритів у зразках ґрунтових вод за допомогою цього колориметричного методу. Дотримуючись стандартних робочих процедур і використовуючи відповідні заходи контролю якості, прилад може надати точні результати.

На рисунку 1.3 проілюстровано зовнішній вигляд цієї станції вимірювання шкідливих речовин у воді.



Рис. 1.3 – Загальний вигляд спектрофотометру Nach DR6000[68]

Для вимірювання діоксиду азоту за допомогою видимого спектрофотометра Nach DR6000 використовується колориметричний метод[69]. Ось конкретні кроки:

Підготовка проб. Зразки підземних вод відбираються з поля та доставляються в лабораторію для дослідження. Їх необхідно відфільтрувати та дехлорувати, щоб видалити будь-які заважаючі речовини та забезпечити точні результати.

Приготування реагенту. Колориметричний реагент готують шляхом змішування нітритного буфера та сульфаніламідного реагенту. Цей реагент додають до зразка для утворення діазосполуки, яка поглинає світло на певній

довжині хвилі.

**Вимірювання.** Вимірний об'єм підготовленого зразка додають у кювету, яку поміщають у спектрофотометр. Прилад автоматично вибирає оптимальну довжину хвилі для аналізу та вимірює абсорбцію діазосполуки на цій довжині хвилі.

**Розрахунок.** Вимірювання абсорбції, отримане за допомогою спектрофотометра, використовується для розрахунку концентрації нітритів у зразку за допомогою закону Бір-Ламберта, який пов'язує абсорбцію з концентрацією. Концентрація вказується в одиницях мг/л або проміле[70].

Якщо говорити про засоби вимірювання концентрації  $\text{NO}_2$  у повітрі то тут є великий вибір інструментів. Розглянемо Drager X-am 3500, який продемонстровано на рисунку 1.4.



Рис. 1.4 – Загальний вигляд Drager X-am 3500[71]

Drager X-am 3500 – це портативний газовий детектор, який може вимірювати концентрацію різних газів, у тому числі діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ), у повітрі. Він розроблений для використання в широкому діапазоні застосувань, наприклад у промисловості, гірничій справі та реагуванні на надзвичайні ситуації[72].

Пристрій використовує різні технології виявлення, а саме: електрохімічні, інфрачервоні та каталітичні датчики, щоб виявляти різні гази. Він може виявляти до чотирьох газів одночасно, також  $\text{NO}_2$ , і може бути налаштований для виявлення

інших газів, таких як кисень ( $O_2$ ), чадний газ ( $CO$ ), сірководень ( $H_2S$ ) тощо. Drager X-am 3500 розроблений як надійний і довговічний, з прогумованим корпусом, який стійкий до ударів, пилу та води. Він має чіткий дисплей із підсвічуванням, який показує концентрацію газу в режимі реального часу, а також має звукову та візуальну систему сигналізації, яка сповіщає користувача, коли концентрація газу перевищує попередньо встановлені порогові значення. Пристрій живиться від перезаряджуваної літій-іонної батареї, яка забезпечує до 12 годин безперервної роботи, і його можна заряджати за допомогою стандартного кабелю USB або зарядної підставки.

Drager X-am 3500 використовує електрохімічний датчик для вимірювання рівня діоксиду азоту ( $NO_2$ ) у повітрі. Датчик працює шляхом електрохімічного окислення молекул  $NO_2$ , які контактують із чутливим електродом. Це створює електричний струм, пропорційний концентрації  $NO_2$  у повітрі. Пристрій може вимірювати концентрацію  $NO_2$  в діапазоні від 0 до 20 частин на мільйон (ppm) з роздільною здатністю 0,1 ppm. Електрохімічний датчик у приладі має високу чутливість до  $NO_2$  і низьку перехресну чутливість до інших газів, що допомагає забезпечити точні та надійні вимірювання.

Drager X-am 3500 також має низку особливостей, які стосуються вимірювання  $NO_2$ . Наприклад, пристрій має програмовану функцію середнього зваженого за часом (TWA), яку можна використовувати для розрахунку середньої концентрації  $NO_2$  за встановлений період часу, наприклад, 8-годинний робочий день. Це може бути корисно в умовах, коли працівники можуть піддаватися впливу  $NO_2$  протягом тривалого періоду часу.

Пристрій також має функцію пікового значення, яка фіксує найвищу концентрацію  $NO_2$ , виміряну протягом певного періоду часу. Це може бути корисним для визначення короточасних піків впливу, які можуть бути небезпечними для працівників.

Загалом Drager X-am 3500 — це універсальний і надійний детектор газу, який можна використовувати для вимірювання  $NO_2$  та інших газів у різних налаштуваннях. Він широко використовується в промислових і надзвичайних

ситуаціях, а також в інших сферах застосування, де виявлення газу є важливим для безпеки працівників і моніторингу навколишнього середовища.

Наступним розглянемо Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer, який зображено на рисунку 1.5.



Рис. 1.5 – Загальний вигляд Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer[73]

Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer — це портативний пристрій, призначений для вимірювання та аналізу якості повітря в режимі реального часу. Здатний виявляти та контролювати забруднювачі, такі як оксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), озон (O<sub>3</sub>), діоксид сірки (SO<sub>2</sub>), тверді частинки (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>) і летючі органічні сполуки). Пристрій використовує передові сенсорні технології для виявлення та вимірювання цих забруднювачів, а також надає точні та надійні дані про якість повітря в режимі реального часу. Дані, зібрані пристроєм, можна переглядати в додатку для смартфона або на веб-панелі, що дозволяє користувачам відстежувати тенденції якості повітря та приймати обґрунтовані рішення щодо свого здоров'я та навколишнього середовища [74].

Однією з ключових особливостей гіперлокального аналізатора якості повітря

Sniffer4D є його можливості гіперлокального моніторингу. Пристрій здатний виявляти та вимірювати якість повітря на дуже локальному рівні, надаючи інформацію про якість повітря в певних місцях, таких як на розі вулиці, парк або будівля. Це робить його цінним інструментом для окремих осіб, громад і компаній, які стурбовані впливом забруднення повітря на своє здоров'я та навколишнє середовище. Hyper-local Air Quality Analyzer Sniffer4D також простий у використанні, має простий інтерфейс та інтуїтивно зрозумілі елементи керування. Він легкий і портативний, тому його легко переносити та розгортати в різних місцях. Має низьку вартість, що робить його доступним для широкого кола користувачів.

Даний пристрій використовує електрохімічний датчик для вимірювання рівня  $\text{NO}_2$  у повітрі. Датчик працює, виявляючи зміни в електричному струмі, що виникають, коли молекули  $\text{NO}_2$  вступають у контакт з електродами датчика. Коли Sniffer4D виявляє  $\text{NO}_2$  у повітрі, він вимірює концентрацію  $\text{NO}_2$  у частках на мільярд (ppb) і відображає результати на екрані пристрою або в додатку для смартфона в режимі реального часу. Пристрій також може записувати та зберігати дані про  $\text{NO}_2$  для подальшого аналізу.

Щоб використовувати гіперлокальний аналізатор якості повітря Sniffer4D для вимірювань  $\text{NO}_2$ , його слід увімкнути та дати йому прогрітися протягом кількох хвилин, щоб стабілізувати датчик, потім тримати пристрій у бажаному місці для вимірювання, переконавшись, що він спрямований в напрямку потоку повітря та подалі від будь-яких перешкод. Після чого пристрій почне виявляти та вимірювати рівні  $\text{NO}_2$  у режимі реального часу, а результати відобразатимуться на екрані пристрою або в додатку для смартфона. Користувач також може налаштувати пристрій, щоб сповіщати його, коли рівень  $\text{NO}_2$  перевищує певний поріг, дозволяючи йому вжити заходів для захисту свого здоров'я та навколишнього середовища.

Загалом, Hyper-local Air Quality Analyzer Sniffer4D є потужним інструментом для моніторингу та аналізу якості повітря в реальному часі. Його можливості гіперлокального моніторингу, простота використання та низька вартість роблять

його цінним інструментом для окремих осіб, громад і компаній, які стурбовані забрудненням повітря та його впливом на здоров'я та навколишнє середовище.

В таблиці 1.2 наведено загальні характеристики вищезазначених приладів вимірювання концентрації діоксиду азоту в навколишньому середовищі.

Таблиця 1.2

Загальні характеристики приладів вимірювання концентрації діоксиду азоту в навколишньому середовищі

	Лабораторія iCAP RQ ICP-MS	Спектрофотометр Hach DR6000	Drager X-am 3500	Hyper-local Air Quality Analyzer Sniffer4D
Діапазон вимірювання	0.01-10 мг/л	0.02 - 0.50 мг/л	0.1 - 2 мг/м <sup>3</sup>	0.01 - 2 мг/м <sup>3</sup>
Похибка вимірювання	0.15%	0.5%	1%	0.25%
Портативність	Стаціонарна лабораторія	Стаціонарна станція	Портативний пристрій	Портативний пристрій
Час калібрації	<10 хв	<8 хв	<6 хв	<5 хв
Час відгуку	0.03 сек	0.05 сек	0.05 сек	0.01 сек
Інтеграції	Відсутні	Відсутні	Відсутні	Квадрокоптер DJI M100
Вартість (на 2022)	1 250 000 грн	150 000 грн	60 000 грн	100 000 грн
Кількість сенсорів	32	15	4	9

Як видно з порівняльної таблиці приладів для вимірювання концентрації діоксиду азоту Hyper-local Air Quality Analyzer Sniffer4D є найкращим рішенням оскільки в нього висока точність вимірювання, короткий час відгуку та наявність

зовнішніх інтеграцій, що є вагомими перевагами в порівнянні з іншими приладами.

#### 1.4 Постановка задачі

Забруднення довкілля внаслідок антропогенної діяльності людини є важливою проблемою людства, яка суттєво впливає на якість життя людей, усієї флори і фауни, спричинюючи різноманітні захворювання та патології. Особливої уваги потребує дослідження стану та ідентифікації особливо небезпечних джерел забруднення ґрунтів та ґрунтових вод. Як відомо [75], хімічні речовини, використовувані в сільському господарстві (мінеральні добрива, пестициди, ядохимікати і та ін.) є головними джерелами хімічного забруднення ґрунтів, атмосферні опади в радіусі дії промислових підприємств (особливо хімічний і металургійних), видобуток корисних копалин, теплові й атомні електростанції, а також автотранспорт.

Природа джерел шкідливих забруднень є різною, відповідно є різною їх комплексний вплив на атмосферне повітря, ґрунти та водні ресурси. Для мінімізації негативного впливу на довкілля, на сьогоднішній день існує різноманіття систем для його моніторингу [76]. Найкращих результатів досягнуто в моніторингу атмосферного повітря, якість якого має безпосередній вплив на дихальну систему людини і призводить до миттєвих наслідків щодо захворюваності [77]. Разом з тим, особливої уваги потребує дослідження стану та ідентифікація особливо небезпечних джерел забруднення ґрунтів та ґрунтових вод. Їх забруднення переважно має більш віддалені наслідки на здоров'я людини, а також на флору і фауну [78].

Значна частина джерел забруднення призводить до локальних забруднень, але певні фактори впливають на регіональний і навіть глобальний рівні, особливо коли мова йде про забруднення, викликане атмосферними опадами або застосуванням добрив на великих територіях..

Хімічне забруднення ґрунтів переважно має дві першопричини:



1. поглинанням верхнім шаром ґрунту викидів шкідливих речовин в атмосферу;
2. безпосереднім внесенням хімічних речовин у виді добрив, пестицидів, гербіцидів.

Перший спосіб забруднення особливо є актуальним для великих міст та ґрунтів, які безпосередньо близько до міст. Варто зазначити, що через випадання опадів, або через безпосередню близькість джерела викидів до ґрунту, відбувається забруднення ґрунтових вод і прилеглих водойм. Оскільки мова йде про дифузійні процеси в ґрунтах, на територіях прилеглих до великих міст, то найбільшим забрудником хімічними речовинами для великих міст є автотранспорт. Тим більше, що сучасні тенденції планування та розбудови міст полягають у розміщені шкідливих виробництв далеко за межами міста.

У вихлопних газах автотранспорту є цілий спектр шкідливих речовин, найбільш небезпечним серед яких у великих концентраціях є діоксид азоту.

Хімічне забруднення ґрунтів через поглинання верхнім шаром ґрунту викидів шкідливих речовин в атмосферу автотранспорту є актуальним для великих міст, а також для прилеглих до них ґрунтів та водойм. Разом з тим, моніторингу даного виду забруднень ґрунтів і водойм приділено недостатньо уваги. Переважно розглядають опосередковане забруднення ґрунтів через випадання опадів [79]. Разом з тим, не беруть до уваги, наприклад, забруднення ґрунтів та водойм шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту. У таких випадках, через високу вологість повітря цей вид забруднень через безпосередню близькість джерела викидів до ґрунту та водойм внаслідок дифузійних процесів спричинює забруднення ґрунтів, ґрунтових вод і прилеглих водойм [80].

Проблема з шкідливими викидами діоксиду азоту не тільки в забрудненні атмосферного повітря, але і приземистого його шару, що сприяє дифузії цієї забруднюючої речовини у ґрунти та водойми прилеглих ділянок автодороги. Подальші процеси дифузії діоксиду азоту пов'язані із попаданням у ґрунтові води, перетворення на азотну кислоту і вимиванням її солей у водойми, що спричинює насичення водойм нітратами, які, як відомо, є надзвичайно шкідливими для людини

та фауни. На перший погляд, такі забруднення не є критичними у порівнянні з іншими видами, наприклад, забруднення діоксидом азоту чи іншими шкідливими речовинами теплоелектростанціями чи іншими хімічними виробництвами. Разом з тим, переважно такі об'єкти викидають забруднюючі речовини в атмосферу на великі відстані від приземистого шару, і це сприяє частковому розсіюванню та перенесенню цих забруднюючих речовин в інші місця на великі відстані, за межі прилеглих територій, де вони осідають на ґрунт у меншій концентрації.

Окреме питання моделювання та прогнозування наслідків забруднення ґрунтів та ґрунтових вод через абсорбцію газоподібних речовин ґрунтом. Для цих цілей використовують математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь в частинних похідних, або їх різницеві аналоги, синтезовані алгоритмами структурної ідентифікації [76,77,81]. Проте тут виникає проблема задання початкових умов у вигляді вимірювань концентрацій забруднюючих речовин у приземистому шарі атмосфери. Для цих цілей необхідно використовувати систему моніторингу забруднень автотранспортом приземистого шару атмосфери [81,82]. Варто зазначити, що у вихлопних газах автотранспорту є цілий спектр шкідливих речовин, найбільш небезпечним серед яких у великих концентраціях є діоксид азоту [81,82]. Проблема з шкідливими викидами діоксиду азоту не тільки в забрудненні атмосферного повітря, але і приземистого його шару, що сприяє безпосередній дифузії цієї забруднюючої речовини у ґрунти та водойми прилеглих ділянок автодороги. Подальші процеси дифузії діоксиду азоту пов'язані із попаданням у ґрунтові води, перетворення на азотну кислоту і вимиванням її солей у водойми, що спричинює насичення водойм нітратами, які, як відомо, є надзвичайно шкідливими для людини та фауни [83]. Для великих міст такі забруднення є критичними у порівнянні з іншими видами, наприклад, для великих міст такого типу забруднення складають понад 50% [84], оскільки забруднення діоксидом азоту чи іншими шкідливими речовинами теплоелектростанціями чи іншими хімічними виробництвами переважно здійснюється на великій відстані від приземистого шару, і цей факт сприяє частковому розсіюванню та перенесенню

забруднюючих речовин в інші місця на великі відстані, за межі прилеглих територій, де вони осідають на ґрунт чи у водойми у меншій концентрації [85].

Виходячи із вищезазначеного, актуальною є задача моніторингу забруднення приземистого шару атмосферного повітря діоксидом азоту, походження якого – вихлопні гази автотранспорту та моделювання дифузійних процесів цієї шкідливої речовини у верхніх шарах ґрунту з попаданням у ґрунтові води, перетворення на азотну кислоту і вимиванням її солей у водойми.

Для вирішення задачі та досягнення мети у дисертаційній роботі поставлено такі завдання:

- проаналізувати методи та програмні засоби для моніторингу забруднення довкілля;
- обґрунтувати та розробити метод математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту;
- розробити математичні моделі розподілу концентрації сполук азотної кислоти та супутніх солей у ґрунтах кислоти на основі вимірювання діоксиду азоту в приземному шарі атмосфери;
- розробити архітектуру програмної системи математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів, яка інтегрує програмне забезпечення інформаційно-вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів;
- провести апробацію розроблених методів і математичних моделей.

## Висновки до розділу 1

1. Розглянуто проблему забруднення шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту та її моніторинг. Описано основні типи моніторингу навколишнього середовища, а саме особливості оцінювання рівня забруднення повітря, ґрунтів та ґрунтових вод.

2. Проведено аналіз методів оцінювання рівня забруднення ґрунтів. Установлено найбільш викорисовувані: хмічний аналіз, біоіндикація, геофізичний метод та математичне моделювання. На основі проведеного аналізу відзначено їхні переваги та недоліки та встановлено, що саме математичне моделювання є найефективнішим методом з високою точністю, який економить ресурси.

3. Проведено аналіз засобів оцінювання рівня забруднення ґрунтів, ґрунтових вод та атмосфери. Було наведено різні технічні засоби, які дозволяють вимірювати концентрації діоксиду азоту в навколишньому середовищі. Описано переваги та недоліки даних систем. Встановлено, що пристрій Hyper-local Air Quality Analyzer Sniffer4D є найкращим рішенням для вимірювання забруднення, оскільки, проводячи забір даних в приземистому шарі атмосери, він не порушує цілісність ґрунту.

4. Виходячи з актуальності проблеми моніторингу навколишнього середовища та після проведення аналізу методів та засобів для оцінювання забуднення довкілля, поставлено відповідні завдання для вирішення задачі та досягнення мети дисертаційного дослідження.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ

Моделювання забруднення навколишнього середовища на основі концентрації шкідливих викидів автотранспорту в атмосферу може бути корисним інструментом для вивчення впливу автомобільних викидів на якість ґрунту і навколишнє середовище. Цей процес передбачає вимірювання концентрації шкідливих речовин у викидах автотранспорту і визначення їх впливу на навколишнє середовище.

Для моделювання забруднення ґрунтів на основі концентрації викидів автотранспорту в атмосферу, необхідно здійснити збір вихідних даних у вигляді вимірювань концентрацій цих викидів, розробку математичних моделей та прогнозування забруднення ґрунтів в різних точках.

При цьому збір вихідних даних передбачає вимірювання концентрацій шкідливих викидів автотранспорту: об'єм викидів, склад речовин тощо. Також, можливо, виникатиме необхідність дослідження ґрунтового середовища, за такими параметрами як структура ґрунту, його хімічний склад та фізичні властивості.

Сам процес моделювання базується на розробці математичної моделі на основі даних вимірювань, яка описує взаємодію між викидами автотранспорту і ґрунтовим середовищем. Ця модель, як правило має вигляд рівнянь, що враховують фізичні процеси, такі як дифузія й хімічні реакції. Модель навчається на основі експериментальних даних, що включають вимірювання концентрації шкідливих речовин в атмосфері. Після навчання модель перевіряється на незалежних наборах даних для оцінки її точності та ефективності. Після перевірки вона може бути використана для прогнозування забруднення ґрунтів в різних точках на основі вихідних даних про шкідливі викиди автотранспорту. Це дозволяє оцінити вплив автотранспорту на якість ґрунту і вжити заходів для його збереження та очищення. Моделювання забруднення ґрунтів на основі концентрації шкідливих викидів

автотранспорту в атмосферу може допомогти вивченню проблеми забруднення довкілля та розробці ефективних стратегій зменшення впливу автотранспорту на навколишнє середовище.

## **2.1 Математична модель дифузії концентрації шкідливих викидів автотранспорту в ґрунтах**

Один з підходів для моделювання дифузії концентрації викидів у ґрунтах – використання моделей поширення забруднення в пористому середовищі. Вони базуються на законах масової та імпульсної дифузії і враховують такі фактори, як перенесення забруднення в порах ґрунту, розчинність речовини у воді, хімічні реакції та інші процеси. Моделі дифузії в ґрунтах будують у вигляді диференціальних рівнянь, що описують динаміку концентрації забруднення в ґрунті, в часі та в просторі. Залежно від конкретних умов дослідження, моделі можуть враховувати такі фактори як вологість ґрунту, густину пор, геометрію та структуру ґрунту, властивості забруднюючої речовини та інші [86].

При моделюванні дифузії концентрації шкідливих викидів автотранспорту в ґрунтах також важливо враховувати властивості цих викидів (наприклад, їх хімічний склад, токсичність), характеристики дорожнього покриття, метеорологічні умови та інші фактори, що можуть впливати на дифузію та розповсюдження забруднення в ґрунтах. Моделювання дифузії концентрації шкідливих викидів автотранспорту в ґрунтах може допомогти зрозуміти поширення забруднення, оцінити його вплив на ґрунтове середовище та розробити стратегії мінімізації негативних наслідків.

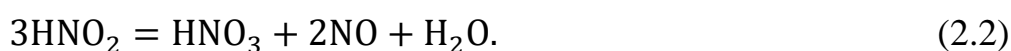
Дифузія концентрації шкідливих викидів автотранспорту в ґрунтах може бути описана за допомогою математичних моделей, які враховують фізичні процеси, що відбуваються в системі «автомобіль-атмосфера-ґрунт» [87-89]. Таким чином, проведені вимірювання концентрації забруднень в приземистому шарі атмосфери (практично на поверхні ґрунту) дають можливість дослідити процеси проникнення цих забруднень у ґрунт та водойми. Із цієї поверхні газові

забруднення проникають у верхні шари розпушеного ґрунту.

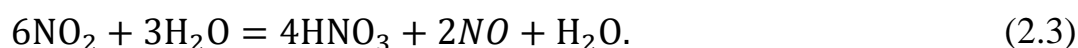
Розглянемо хімічні реакції, які відбуваються у вологому середовищі при поширенні забруднень двоокисом азоту. При цьому двоокис азоту взаємодіє із водою згідно із реакцією [90]:



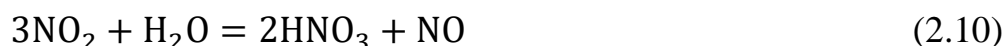
Своєю чергою азотиста кислота, яка утворюється при поглинанні окису азоту як малостійка сполука, розпадається на окис азоту та азотну кислоту [90]:



В підсумку ми можемо розглядати реакцію:



Скорочуючи обидві частини рівняння на молекулу води, отримуємо основне рівняння утворення азотної кислоти:



Азотна кислота у водних розчинах дисоціює на іони. Як сильна одноосновна кислота, вона взаємодіє з основними і амфотерними оксидами (міді та цинку) з основами та витісняє слабкі кислоти з їх солей, наприклад, із карбонату кальцію, що міститься у вапняках та крейді. Двоокис азоту та азотна кислота – отруйні речовини – граничні допустимі концентрації яких  $C_{\text{NO}_2, \text{B}}$   $C_{\text{HNO}_3, \text{B}}$  лімітуються національними стандартами. Значне перевищення граничних допустимих доз служить підставою для хімічної меліорації ґрунтів вапняковими добривами та побудови очисних споруд для водойм.

Основним механізмом масопереносу газів у ґрунті, а також газообміну між ґрунтом та атмосферою є дифузія – переміщення газів під дією градієнта концентрацій. Механізми конвективної дифузії під дією температурних градієнтів, гравітаційної під дією сили тяжіння, а також під дією перепадів атмосферного тиску мають допоміжне значення [90].

Проаналізуємо підходи до моделювання концентрації двоокису азоту в ґрунті. Аналізовані ділянки забруднень характеризується доволі значними розмірами в порівнянні із глибиною проникнення забруднень, а концентрації забруднень на поверхні ґрунту не характеризується значними градієнтами. Це дозволяє розглядати аналіз поля концентрацій забруднень в ґрунті як локальну задачу в кожній точці спостереження на поверхні із єдиним аргументом – віддаллю точки спостереження від поверхні ґрунту. В цьому випадку отримуємо одновимірне рівняння дифузії:

$$\frac{d}{dh} \left[ D_S(h) \frac{dC_i^S(h)}{dh} \right] = 0, \quad (2.5)$$

де,

$i$  – номер точки спостереження;

$D_S(h)$  – коефіцієнт дифузії двоокису азоту у ґрунті;

$C_i^S(h)$  – концентрація забруднень ґрунту в околі  $i$ -ої точки спостереження.

Нелінійне диференціальне рівняння дифузії (2.5) зведемо до вигляду зручного для застосування чисельних методів:

$$\frac{d^2 C_i^S(h)}{dh^2} + \frac{D_S'(h)}{D_S(h)} \frac{dC_i^S(h)}{dh} = 0. \quad (2.6)$$

Доповнимо його граничними умовами Діріхле на поверхні ґрунту ( $h=0$ ), де використаємо результати спостережень  $P_i$  за забрудненнями поверхні в  $i$ -й точці спостережень, скоригованими на перепад значень коефіцієнтів дифузії у повітрі  $D_A$  та на поверхні ґрунту  $D_S(0)$ :

$$C_i^S(0) = P_i \frac{D_S(0)}{D_A}. \quad (2.7)$$

На нижній межі найродючішого шару ґрунту  $H_y$  в першому наближенні застосуємо умову непроникнення типу Неймана:



$$\frac{dC_i^S(h)}{dh} \Big|_{h=H_y} = 0. \quad (2.8)$$

Аналогічну задачу можна поставити і для водойми. Вважаючи коефіцієнт дифузії у воді постійним, можемо отримати аналітичне подання її розв'язку, однак саме допущення про постійність коефіцієнта дифузії азотної кислоти у воді є надмірним спрощенням. Зокрема за даними ресурсу [91] такий коефіцієнт дифузії залежить від концентрації самої кислоти. Враховуючи це, одновимірне рівняння дифузії азотної кислоти у воді,

$$\frac{d}{dh} \left[ D_W(C_i^W(h)) \frac{dC_i^W(h)}{dh} \right] = 0, \quad (2.9)$$

подамо таким чином:

$$D_W(C_i^W(h))'_{C^W} \left[ \frac{dC_i^W(h)}{dh} \right]^2 + D_W(C_i^W(h)) \frac{d^2 C_i^W(h)}{dh^2} = 0 \quad (2.10)$$

За аналогією із задачею (2.6)-(2.8), отримуємо задачу (2.11)-(2.13) для побудови розподілу концентрації азотної кислоти у воді:

$$\frac{d^2 C_i^W(h)}{dh^2} + \frac{D_W(C_i^W(h))'_{C^W}}{D_W(C_i^W(h))} \left[ \frac{dC_i^W(h)}{dh} \right]^2 = 0, \quad (2.11)$$

$$C_i^W(0) = P_i^W, \quad (2.12)$$

$$\frac{dC_i^W(h)}{dh} \Big|_{h=H_b} = 0, \quad (2.13)$$

де,

$i$  – номер точки спостереження;

$D_W(C)$  – функція дифузії азотної кислоти у воді в залежності від концентрації;

$C_i^W(h)$  – концентрація забруднень води в околі  $i$ -ої точки спостереження,  
 $H_b$  – усереднена глибина водойми, над якою ведуться спостереження.

Для розв'язання диференціальних рівнянь дифузії в ґрунтах можуть застосовуватися чисельні методи, такі як метод різницевих апроксимацій або метод скінчених різниць. Ці методи дозволяють апроксимувати диференціальне рівняння та отримати числові розв'язки для концентрації забруднення в ґрунті [91, 92].

Використаємо запропоновану методику для побудови математичної моделі дифузії концентрації шкідливих викидів автотранспорту в ґрунтах [93]. Для цього було використано результати вимірювань на основі аеромобільного комплексу, який детально буде описано в наступних розділах.

Оцінювання впливу забруднюючих речовин, зокрема діоксиду азоту на забруднення ґрунтів, здійснювалося на ділянці дороги Р 41 на дистанції до 200 метрів. Ця ділянка характеризується інтенсивним рухом автотранспорту і розміщена на автомобільному шляху регіонального значення на території України, біля села Чистилів (об'їзна дорога м. Тернопіль, Україна).

Спочатку вимірювання проводилося на висоті від 1 до 5 метрів над проїжджою частиною дороги та вздовж ділянки дороги на відстані від 2-5 метрів. Результати вимірювань наведено на рисунку 2.1 (А, В). Шляхом переміщення аеромобільного засобу (квадрокоптера) з комплексом Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer наступні вимірювання, в такий же спосіб, проводилися вздовж дороги на відстані 10-30 метрів, рисунок 2.1 (С), 40-70 метрів, рисунок 2.1 (D), 70-90 метрів, рисунок 2.1 (Е), 100-130 метрів, рисунок 2.1 (F), 140-160 метрів, рисунок 2.1 (G).

В другій серії досліджень аеромобільний комплекс вимірював концентрації діоксиду азоту на висоті 30 метрів над тією ж самою ділянкою, яка прилегла до дороги. У подібний спосіб, як в першому експерименті, вздовж дороги проводили вимірювання над дорогою, рисунок 2.2 (А), 10-30 метрів на відстані від дороги, рисунок 2.2 (В), 40-70 метрів, рисунок 2.2 (С), 70-90 метрів, рисунок 2.2 (D), 100-130 метрів, рисунок 2.2 (Е).

На отриманих «квадратних» ділянках фіксувалося миттєве значення

концентрацій діоксиду азоту в мікрограмах на кубічний метр повітря( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



Рис. 2.1. Результати візуалізації вимірювань діоксиду азоту на висоті 1-5 метрів

За допомогою інстальованого програмного забезпечення Sniffer4D Mapper підготовлено таблицю даних, фрагмент якої наведено на рисунку 2.3.

Для розв'язування задач (2.6)-(2.8) та (2.11)-(2.13) використали програмний модуль `solve_bvp` із розділу `integrate` Python-бібліотеки `Scipy`. Модуль побудовано на основі «методу стрільби» із використанням методу різницевих апроксимацій, який описано у роботі [92].

Використання даного модуля передбачає подання функціональної залежності коефіцієнта дифузії  $\text{NO}_2$  в ґрунті. Для її побудови використано одержані табличні дані, а також модуль `UnivariateSpline` із розділу `interpolate` Python-бібліотеки `Scipy`.



Рис. 2.2. Результати візуалізації вимірювань діоксиду азоту на висоті 30 метрів

Продемонструємо результати деяких чисельних експериментів, реалізованих на основі описаної методики. Для цього було вибрано спостереження із лінії D, які характеризуються порівняно значними розходженнями спостережених концентрацій забруднень. У першій серії експериментів змодельовано розподіл концентрацій забруднень в ґрунті в околі точок лінії D, де спостерігалися найбільші, найменші та медіанні значення концентрації забруднень в приземистому шарі атмосфери.

Результати експериментів подано на рисунку 2.10. Слід зауважити, що початкові значення концентрацій у верхньому шарі ґрунту перераховані відносно концентрацій в атмосфері згідно з формулою (2.7). По осі абсцис подано віддаль від поверхні ґрунту в метрах, а по осі ординат – концентрації забруднень із множником  $10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Аналіз графіків свідчить, що значимі проникнення забруднень в газоподібному стані припиняються практично на глибині 10 сантиметрів.

A	B	C	D	E	F	G	H
#Created by: Sniffer4DMapper 2.1.10.10							
ProjectName : 30m Organization : test							
Time Stamp	Abs.Alt	Longitude	Latitude	Temperature °C	Humidity %	Pressure Pa	NO2 µg/m³
2020-11-19 13:1	0	25.560628820937410	49.601886314154569	4.313725	81.176468	98767.546875	41.372471
2020-11-19 13:1	0	25.560626809280649	49.601886649430696	4.313725	81.176468	98767.546875	41.372471
2020-11-19 13:1	0	25.560625468176141	49.601887487621013	4.313725	81.176468	98767.546875	41.372471
2020-11-19 13:1	0	25.560624462347761	49.601888493449394	4.313725	81.176468	98767.546875	41.372471
2020-11-19 13:1	0	25.560623959433570	49.601889331639711	4.313725	81.176468	98767.546875	41.842613
2020-11-19 13:1	0	25.560624965261951	49.601889499277775	4.313725	81.176468	98757.781250	41.372471
2020-11-19 13:1	0.412	25.560625300538078	49.601889625006322	4.313725	81.176468	98767.546875	41.372471
2020-11-19 13:1	0	25.560626306366458	49.601890295558576	4.313725	81.176468	98767.546875	40.902328
2020-11-19 13:1	0.824	25.560628820937410	49.601892139577274	4.313725	81.176468	98757.781250	40.902328
2020-11-19 13:1	0.412	25.560629659127727	49.601892642491464	4.313725	81.372551	98757.781250	40.902328
2020-11-19 13:1	0.412	25.560630162041917	49.601892977767591	4.313725	81.372551	98757.781250	40.902328
2020-11-19 13:1	0.412	25.560628988575473	49.601893313043718	4.313725	81.372551	98757.781250	41.372471
2020-11-19 13:1	0.824	25.560628820937410	49.601893648319844	4.313725	81.372551	98757.781250	41.842613
2020-11-19 13:1	0.412	25.560629156213537	49.601893983595971	4.313725	81.568626	98757.781250	41.842613
2020-11-19 13:2	0.412	25.560624294709697	49.601894151234035	4.313725	81.176468	98757.781250	42.312756
2020-11-19 13:2	0.412	25.560620774310365	49.601894318872098	4.313725	81.568626	98757.781250	42.312756
2020-11-19 13:2	0.412	25.560620271396175	49.601894654148225	4.313725	81.568626	98757.781250	42.312756
2020-11-19 13:2	0.412	25.560620420024228	49.601894690424252	4.313725	81.568626	98757.781250	42.312756

Рис. 2.3. Ілюстрація фрагменту таблиці результатів вимірювань діоксиду азоту, сформованої Sniffer4D Mapper

У наступній серії експериментів концентрації забруднень моделювалися в околі кожної точки спостережень лінії D. Відповідні концентрації на різних глибинах до 10 сантиметрів відображені на рисунку 2.5.

По осі абсцис показано віддалі точок спостережень від лівого краю лінії D, а по осі ординат – концентрації забруднень із множителем  $10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Спостерігається рівномірне зниження концентрації по всіх точках лінії D.

Перейдемо до аналізу задачі (2.11)-(2.13). Перш за все, порівняємо коефіцієнти дифузії двоокису азоту в повітрі та у воді. Згідно із даними публікації [90] при найнижчих концентраціях кислоти коефіцієнт дифузії складає  $2.984 \cdot 10^{-1} \frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$ .



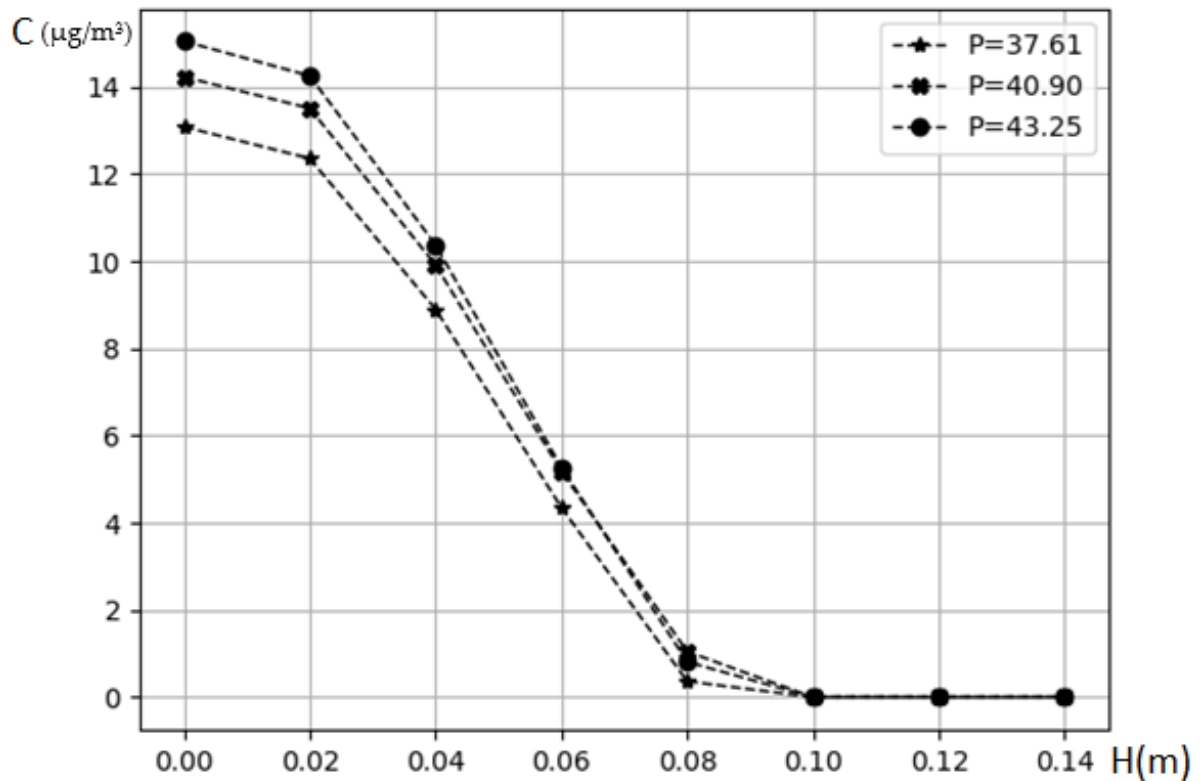


Рис. 2.4. Змодельовані концентрації діоксиду азоту в ґрунті в околі деяких точок лінії D

Це більше ніж коефіцієнт дифузії двоокису вуглецю в повітрі в  $10^4$  разів. Таке значне переважання коефіцієнту дифузії у воді над коефіцієнтом дифузії в повітрі призводить до того, що концентрація забруднень у верхньому шарі води дорівнюватиме їх концентрації в нижньому шарі води.

Мінімальні зміни коефіцієнту дифузії азотної кислоти в широкому діапазоні її концентрації означають, що другу компоненту в рівнянні (2.11) можна прирівняти до нуля. Нульова умова Неймана в нижньому шарі води означає постійність цієї концентрації у всьому шарі. Тому залишається допустити концентрацію азотної кислоти постійною на рівні граничного значення:

$$P_i^W = \frac{2}{3} P_i. \quad (2.14)$$

Коефіцієнт отримуємо з рівняння хімічної реакції (2.10) згідно із законом збереження мас.

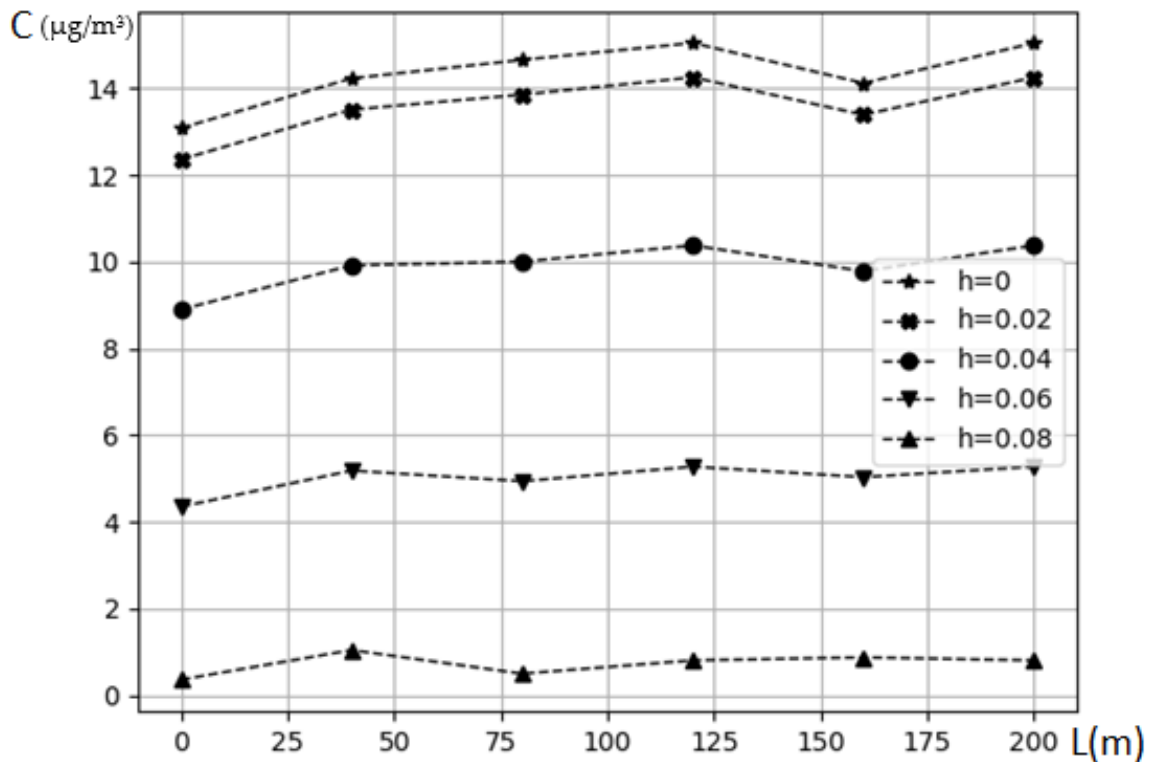


Рис. 2.5. Поле концентрацій діоксиду на різних глибинах для точок спостереження лінії D.

Проведений аналіз у сукупності з методом розв'язання задачі (2.6)-( 2.8) дозволяє будувати розподіл забруднень вздовж лінії G, яка перетинає як поверхню озера, так і ґрунтову ділянку. Результати відповідних чисельних експериментів подані на рисунку 2.6.

По осі абсцис показані віддалі точок спостережень від лівого краю лінії D, а по осі ординат – концентрації забруднень із множником  $10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . При цьому концентрація забруднень у водоймі значно переважає ґрунтову.

У результаті проведених обчислень побудовано розподіл концентрацій забруднень для ґрунту та води в околах окремих точок спостережень, а також розподіл концентрації забруднень в околах пари точок спостережень підсистем типу озеро-узбережжя.

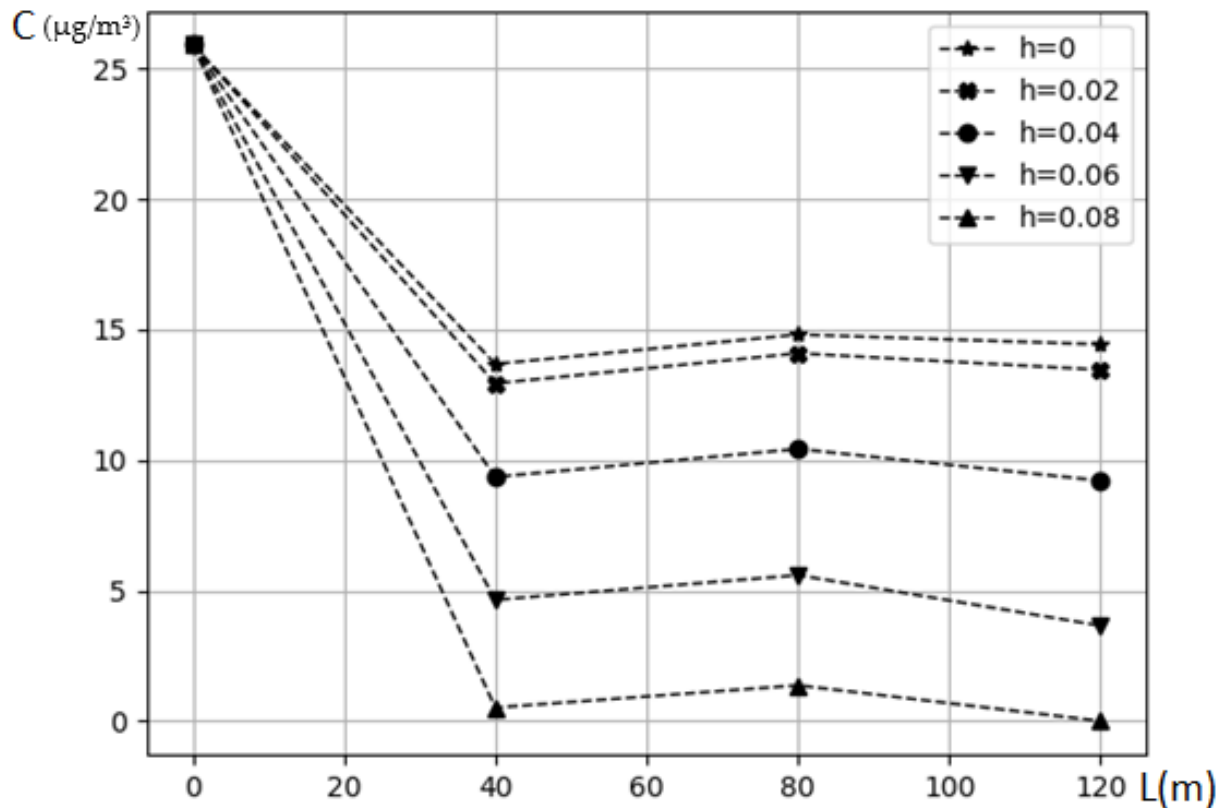


Рис. 2.6. Поле концентрацій діоксиду або азотної кислоти на різних глибинах для точок спостереження лінії G

Отже, у першій серії експериментів змодельовано розподіл концентрацій забруднень у поперечному перерізі ґрунту в околі точок вздовж лінії, на основі отриманих концентрацій з мобільного вимірювального комплексу, де спостерігалися найбільші, найменші та медіанні значення концентрації забруднень у приземистому шарі атмосфери. Встановлено, що значимі проникнення забруднень в газоподібному стані припиняються практично на глибині 10 сантиметрів.

У наступній серії експериментів концентрації забруднень моделювалися в околі кожної точки спостережень вздовж однієї лінії. Спостерігається рівномірне зниження концентрації по всіх точках лінії із зростанням глибини, що повністю узгоджується з фізикою процесу дифузії. Для водойми коефіцієнти дифузії суттєво вищі і відповідно концентрація азотної кислоти, яка утворюється внаслідок взаємодії діоксиду азоту з водою, вища у воді, ніж у поверхневому шарі ґрунту.



## 2.2. Математичні моделі динаміки шкідливих викидів автотранспорту в атмосферу

Для кращого розуміння негативних наслідків забруднення повітря для здоров'я людей необхідно детально оцінити його вплив. Епідеміологічні дослідження надали значну кількість доказів, що пов'язують високі рівні забруднення повітря з погіршенням стану здоров'я [94-96]. Основним об'єктом дослідження зазвичай є масові концентрації шкідливих часток та окремих газоподібних забруднювачів. Модуль прогнозування системи моніторингу ґрунтується на математичних моделях, які описують динаміку поширення концентрацій забруднювачів в повітрі внаслідок викидів, здійснюваних транспортними засобами. Для цього використовуються різницеві рівняння, що аналогічні диференціальним рівнянням з частковими похідними. Ці математичні моделі дозволяють враховувати інтенсивність джерел забруднення, таких як автотранспорт, для розрахунків поширення забруднень. [97].

Результати вимірювань є основним елементом для ідентифікації та навчання моделей. Після навчання моделі використовуються для прогнозування динаміки поширення концентрацій забруднень. Використання різницевих рівнянь як підходу для моделювання динаміки поширення концентрацій забруднень, що виникають внаслідок шкідливих викидів у вихлопних газах автотранспорту, гарантує надійну точність та передбачувані властивості отриманих моделей. Крім того, їх можна налаштувати відповідно до умов навколишнього середовища, в яких вони використовуються [97-100]. Дані вимірювань концентрації забруднення атмосферного повітря представлені у вигляді наборів, отриманих у інтервальному вигляді, за рахунок наявності похибок вимірювань :

$$u_{k,1} \cdots u_{k,n} \rightarrow [C_k^-; C_k^+], k = 0, \dots, K, \quad (2.15)$$

де

$C_k^-, C_k^+$  – нижня та верхня межі інтервалу можливих значень концентрації шкідливих викидів, встановлених за результатами вимірювань, у часових

дискретах  $k = 0, \dots, K$ , що відповідають частоті вимірювань;

$u_{k1} \cdots u_{kn}$  – значення зовнішніх факторів впливу на вимірювання (погодні умови, геолокація, тощо);

$n$  – кількість факторів.

Нехай модель динаміки концентрацій забруднення шкідливою речовиною можна представити у загальному вигляді таким різницеvim оператором (РО) [101]:

$$C_k = \vec{\varphi}^T(\hat{g}) \cdot \vec{f}(C_0, \dots, C_{k-1}, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k), k = d, \dots, K, \quad (2.16)$$

де,

$\vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k$  – вектори вхідних змінних (управління);

$d$  – порядок дискретної динамічної моделі (ДДМ);

$\vec{g}$  – вектор параметрів моделі;

$\vec{f}(\bullet)$  – вектор базисних функцій;

$\vec{\varphi}(\bullet)$  – вектор базисних функцій для параметрів.

Невідомий вектор параметрів  $\vec{g}$  різницевого оператора оцінюється за умовами належності прогнозованих значень до відповідного інтервалу виміряних значень. Вказані умови представлені у такому вигляді:

$$[\hat{C}_k] = [\hat{C}_k^-; \hat{C}_k^+] \subseteq [C_k^-; C_k^+], k = 0, \dots, K, \quad (2.17)$$

де,

$[\hat{C}_k]$  – інтервальний вигляд модельованої концентрації шкідливих викидів на часовій дискреті  $k$ ;

$\hat{C}_k^-, \hat{C}_k^+$  – відповідно, нижня та верхня межі прогнозного інтервалу значень концентрації шкідливих викидів, який в загальному випадку обчислюється за формулою РО:

$$[\hat{C}_k] = [\hat{C}_k^-; \hat{C}_k^+] = \vec{\varphi}^T(\hat{g}) \cdot \vec{f}([\hat{C}_{k-d}], \dots, [\hat{C}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k), \quad (2.18)$$

$$k = d, \dots, K,$$

де,

$\hat{g}$  – вектор оцінок параметрів різницевого оператора, який отримуємо із умов належності (2.17).

Оскільки для отримання інтервалу прогнозованої концентрації  $[\hat{v}_k]$  за формулою РО (2.18) обчислення необхідно проводити за правилами інтервальної арифметики, то такий оператор називають інтервальним різницеvim оператором (ІРО).

Підставивши інтервальні оцінки  $[\hat{C}_k]$ , обчислені за формулою (2.18), за наявності початкових умов  $[C_0], \dots, [C_{d-1}]$  у вирази (2.17), отримаємо інтервальну систему нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР) [102, 103] у такому вигляді:

$$\begin{cases} [\hat{C}_k^-; \hat{C}_k^+] \subseteq [C_k^-; C_k^+], \dots, \\ [\hat{C}_{d-1}^-; \hat{C}_{d-1}^+] \subseteq [C_{d-1}^-; C_{d-1}^+]; \\ \hat{C}_k^- \leq \vec{\varphi}^T(\hat{g}) \cdot \vec{f}([\hat{C}_{k-d}], \dots, [\hat{C}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \leq \hat{v}_k^+; \\ k = d, \dots, K. \end{cases} \quad (2.19)$$

Якщо у ІСНАР (2.19) зафіксувати структуру моделі, тобто поточний вектор базисних функцій, то з її розв'язку можемо отримати невідомі оцінки  $\hat{g}$  параметрів моделі. Враховуючи високу обчислювальну складність розв'язування цієї системи (комбінаторну), на практиці, обчислюють тільки точкові оцінки параметрів  $\hat{g}$ . При цьому процес оцінювання трансформують до розв'язання такої оптимізаційної задачі [103]:

$$\delta(\lambda, \hat{g}) \xrightarrow{\lambda = \{\vec{f}([\hat{C}_{k-d}], \dots, [\hat{C}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k)\}, \hat{g}} \min, \quad (2.20)$$

$$\lambda \in F, \quad (2.21)$$

$$\hat{g}_j \in [g_j^{low}; g_j^{up}], j = 1, \dots, m. \quad (2.22)$$

де,

$F = \{f_1(\bullet), f_2(\bullet), \dots, f_s(\bullet)\}$  – множина можливих елементів структури інтервальної моделі;

$g_j^{low}, g_j^{up}$  – нижнє та верхнє можливе значення кожного параметра моделі.

$m$  – кількість параметрів моделі;

У виразі (2.20) критеріальна функція  $\delta(\lambda, \hat{g})$ , яка формується із ІСНАР (2.19), має такий вигляд:

$$\delta(\lambda_s, \hat{g}) = \max_{k=d, \dots, K} \{ |mid(\vec{\varphi}^T(\hat{g}) \cdot \vec{f}([\hat{C}_{k-d}], \dots, [\hat{C}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k)) - mid([C_k])| \} \quad (2.23)$$

якщо

$$[\hat{C}_k] \cap [C_k] = \emptyset, \exists k = d, \dots, K,$$

або:

$$\delta(\lambda_s, \hat{g}) = \max_{k=d, \dots, K} \{ wid(\vec{\varphi}^T(\hat{g}) \cdot \vec{f}([\hat{C}_{k-d}], \dots, [\hat{C}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k)) - wid(\vec{\varphi}^T(\hat{g}) \cdot \vec{f}([\hat{C}_{k-d}], \dots, [\hat{C}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k)) \cap [z_k] \} \quad (2.24)$$

якщо

$$[\hat{C}_k] \cap [C_k] \neq \emptyset, \forall k = d, \dots, K,$$

де  $mid(\bullet), wid(\bullet)$  – операції визначення центру інтервалу та його ширини, відповідно.

Методи ідентифікації інтервальних моделей побудовані на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (ПМБК) [104, 105]. Поведінкові моделі бджолоїної колонії імітують поведінку медоносних бджіл під час пошуку якісних джерел нектару [105].

У основі алгоритмів маніпуляції структурами інтервальних моделей в ході їх ідентифікації на підставі ПМБК є ряд операторів, які реалізують чітко окреслені процедури ПМБК, але над структурами інтервальних моделей, на відміну від класичних АБК.

Реалізуємо алгоритм структурної ідентифікації інтервальних моделей динаміки поширення забруднень, який, на відміну від існуючих, включає обчислювальні процедури адаптивного налаштування вибору структурних елементів у спосіб встановлення для кожного елемента множини структурних елементів імовірності його вибору й зміни цього розподілу на різних фазах ПМБК, що забезпечує нижчу обчислювальну складність реалізації.

На рисунках 2.7-2.10 наведена блок-схема реалізації алгоритму для структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів з використанням адаптивного налаштування вибору структурних елементів. Блок-схема описує послідовність обчислювальних перетворень структур.

Наведена схема ілюструє обчислювальні процеси задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів. Розглянемо детальніше дані обчислювальні процеси.

Алгоритм бджолоїної колонії розподіляється на чотири фази, які імітують поведінку медоносних бджіл у колонії. Перший етап - це фаза ініціалізації, початковий крок для початку роботи з конкретними структурами моделей. Щоб його реалізувати необхідно сформувати початкову множину структурних елементів  $\Lambda_0$  (з потужністю  $S$ ) для всіх структур  $\lambda_s$  із набору елементів  $F$ . Тому для початку роботи алгоритму необхідно задати основні параметри методу:  $LIMIT, [I_{\min}, I_{\max}], F, S$ , де  $I_{\min}, I_{\max}$  – обмеження на розмірність моделей. Реалізація даної частини алгоритму представлена на рисунку 2.7 та описує фазу ініціалізації.

Реалізуємо це наступним чином. Спочатку генеруємо випадкове число  $I$  на проміжку  $[I_{\min}, I_{\max}]$  (блок 3 на рисунку 2.7), яке буде означати кількість елементів у поточній структурі моделі  $S_i$ . Наступний крок – це встановлення ймовірності вибору елемента на основі формули (блок 5 на рисунку 2.7):

$$P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots = P_m = \frac{1}{m}. \quad (2.25)$$

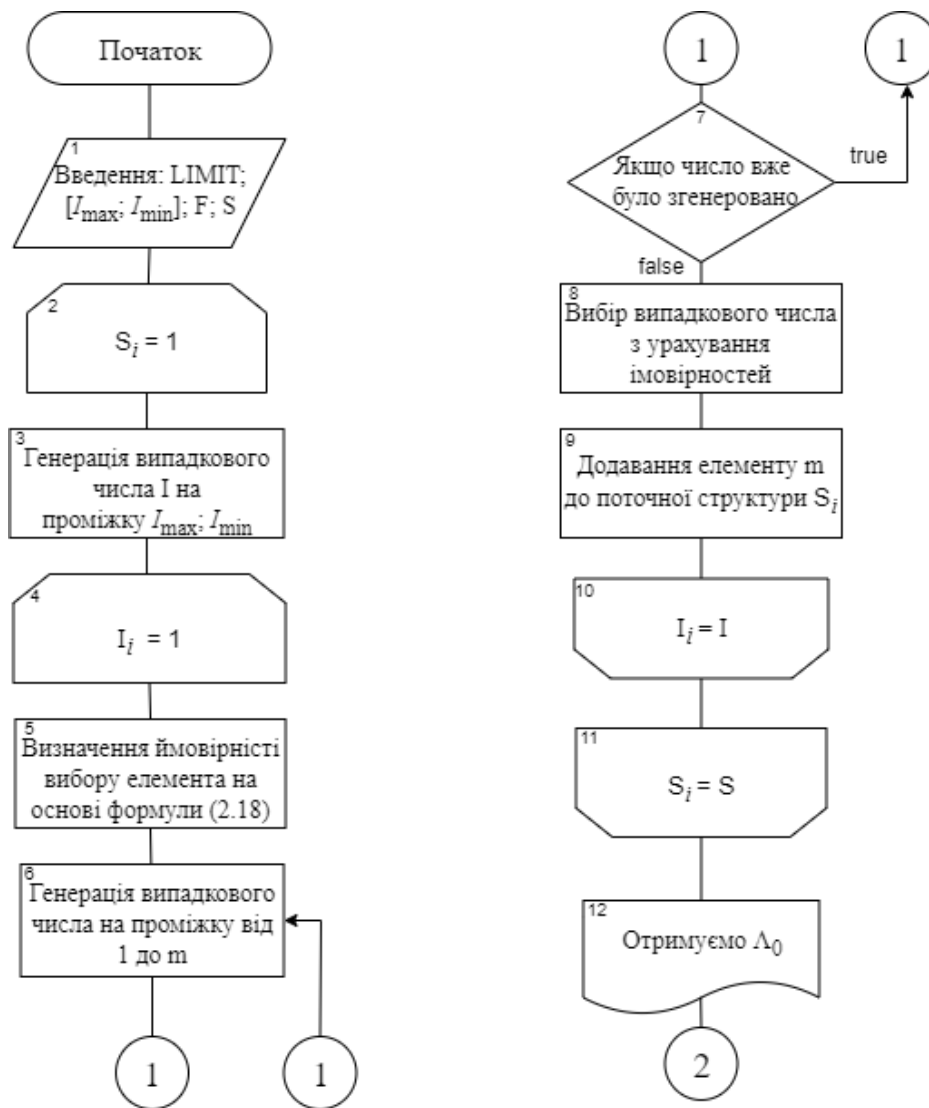


Рисунок 2.7 – Фрагмент блок-схеми алгоритму, який описує фазу ініціалізації

Далі наступає етап генерації випадкового числа в діапазоні від 1 до  $m$  (блок 6 на рисунку 2.7), де  $m$  – кількість доступних елементів в множині  $F$  з використанням імовірностей вибору. Далі вибираємо випадкове число з врахуванням імовірностей (блок 8 на рисунку 2.7) та додаємо відповідний елемент, що відповідає числу  $m$  до структури (блок 9 на рисунку 2.7).

Після цього генеруємо поточну структуру  $S_i$  з кількістю елементів  $I$  (блоки 4-10 на рисунку 2.7). При виконанні даної процедури, слід враховувати ситуацію, коли число  $m$  вже було згенероване, в такому випадку знову повертаємось на етап генерації (блок 7 на рисунку 2.7), оскільки цей структурний елемент вже вибраний. Таким же способом генеруємо інші структури  $S$  (блоки 2-11 на рисунку 2.7) з яких

складається множина  $\Lambda_0$  (блок 12 на рисунку 2.7).

Реалізація наступної частини алгоритму представлена на рисунку 2.8 та описує фазу робочих бджіл. Початком роботи є обчислення якості набору структур на основі формули 2.20 (блок 13 на рисунку 2.8) та відповідно до показника якості – ранжування цього набору (блок 14 на рисунку 2.8).

Продовжуючи на даному етапі реалізації методу, створюємо аналогічні структури, тобто на основі кожної з структур  $\lambda_s$  множини  $\Lambda_0$  формуємо по одній «новій» структурі  $\lambda'_s$  (блоки 15-28 на рисунку 2.8) аналогічно до того, як це робили на фазі ініціалізації (блоки 17-24 на рисунку 2.8).

Після цього обрахуємо  $n_s$  - кількість елементів, які будуть замінені в поточній структурі  $\lambda_s$ . Для здійснення цієї процедури використовуємо таку формулу (блок 25-26 на рисунку 2.8):

$$n_s = \begin{cases} \text{int} \left( \left( 1 - \frac{\min\{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s=1 \dots S\}}{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)} \right) \cdot m_s \right), \\ \text{if } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \neq \min\{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s = 1 \dots S\} \text{ and } n_s \neq 0; \\ 1, \text{ if } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) = \min\{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s = 1 \dots S\} \text{ or } n_s = 0. \end{cases} \quad (2.26)$$

де  $m_s$  – загальна кількість елементів у поточній структурі.

Наступним кроком буде визначення імовірності заміненого елемента на основі формули 2.85. в поточній структурі  $\lambda'_s$  (блок 27 на рисунку 2.8).

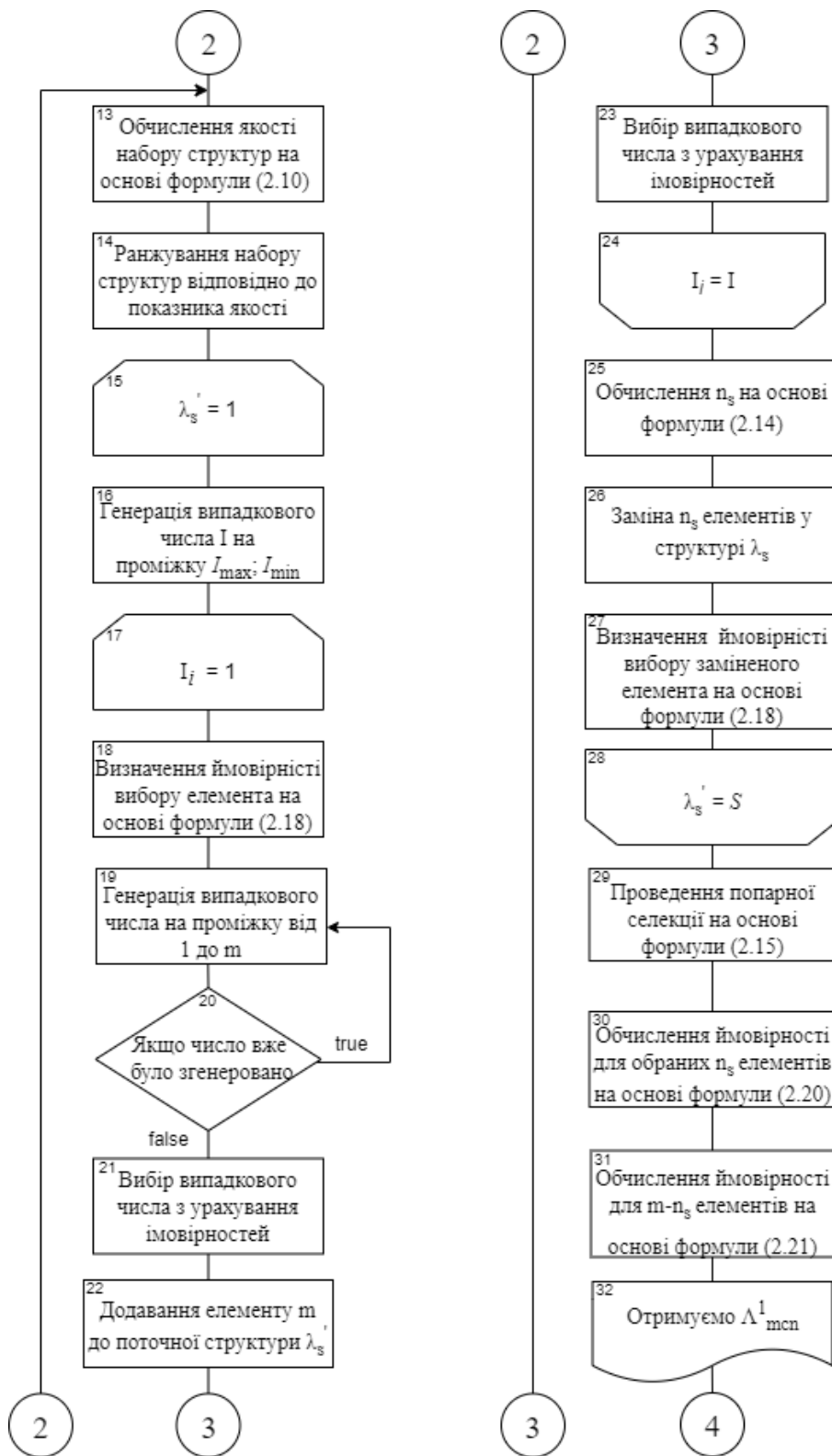


Рисунок 2.8 – Фрагмент блок-схеми алгоритму, який описує фазу робочих бджіл

Після визначення ймовірності проводимо попарну селекцію на основі формули (блок 29 на рисунку 2.8):



$$D_1(\lambda_s, \lambda'_s): \lambda_s^1 = \begin{cases} \lambda_s, \text{ якщо } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \leq \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \\ \lambda', \text{ якщо } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \end{cases} \quad (2.27)$$

Далі перераховуємо ймовірності для вибраних  $n_s$  за формулою (блок 30 на рисунку 2.8)

$$P_i = P_i + \frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi \left( \frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)} \right),$$

$$\text{якщо: } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \wedge (P_i < \frac{1}{m_s}), \quad (2.28)$$

та для  $m - n_s$  елементів за формулою (блок 31 на рисунку 2.8):

$$P_j = P_j - \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \left( \frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi \left( \frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)} \right) \right)}{m - n_s} \right), \quad j \neq i \quad (2.29)$$

В такий спосіб отримуємо набір структур  $\Lambda_{mcs}^1$  (блок 32 на рисунку 2.8).

Реалізація наступної частини алгоритму представлена на рисунку 2.9 та описує фазу бджіл дослідників.

На першому кроці цього етапу з наступною формулою розраховуємо ймовірність зміни структури навколо поточної (блок 34 на рисунку 2.9):

$$P_s(\lambda_s^1) = \frac{1}{\delta(\lambda_s^1, \hat{g}_l^s) \cdot \sum_{s=1}^S \frac{1}{\delta(\lambda_s^1, \hat{g}_l^s)}}, \quad s = 1 \dots S - 1. \quad (2.30)$$

Після цього визначаємо  $R_s$  – кількість структур, яку потрібно згенерувати для поточної за формулою (блок 35 на рисунку 2.9):

$$R_s = \text{ToInt}(P_{s-1}(\lambda_{s-1}^1) \cdot S), \quad s = 2 \dots S, \quad R_1 = 0. \quad (2.31)$$

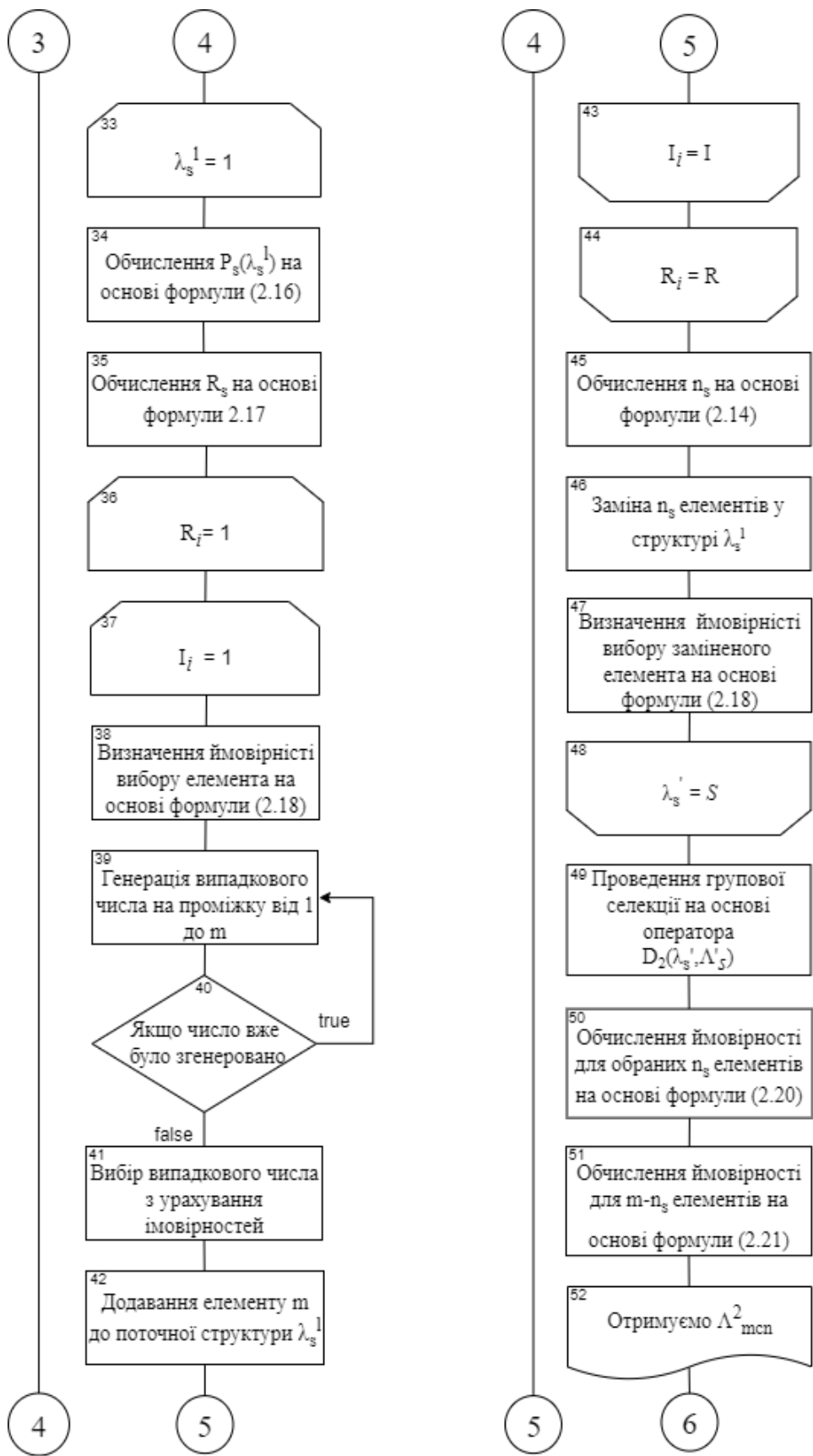


Рисунок 2.9 – Фрагмент блок-схеми алгоритму, який описує фазу бджіл дослідників

Наступним кроком є формування  $R_s$  структур навколо поточної із заміною елементів аналогічно до процедури, яка використовувалася на попередній фазі (блоки 33-48 на рисунку 2.9).

Далі здійснюємо проведення попарної селекції на основі оператора  $D_2(\lambda_s^1, \lambda_s')$  (дана процедура описується блоком 49 на рисунку 2.9).

Після цього здійснюємо перерахунок ймовірності для обраних  $n_s$  елементів за формулою 2.88 (блок 50 на рисунку 2.9) та для  $m - n_s$  елементів за формулою 2.89 (дана процедура описується блоком блоком 51 на рисунку 2.9). Таким чином, отримуємо набір структур  $\Lambda_{mcn}^2$  (блок 52 на рисунку 2.9).

Реалізація наступної частини алгоритму представлена на рисунку 2.10 та описує фазу бджіл дослідників.

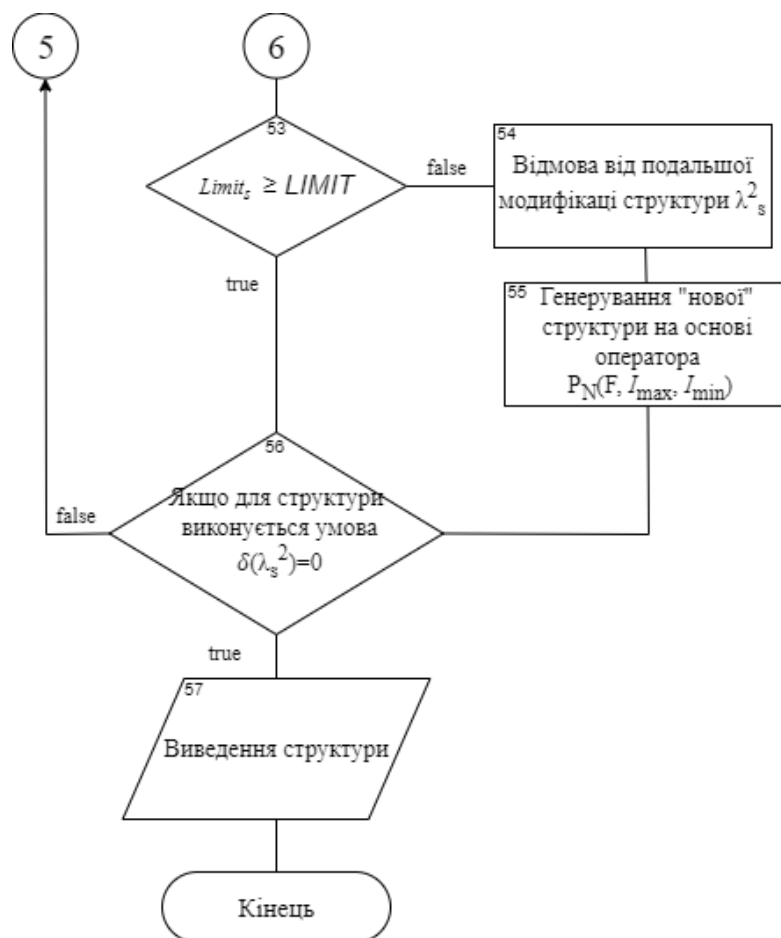


Рисунок 2.10 – Фрагмент блок-схеми алгоритму, який описує фазу бджіл дослідників

Під час завершального етапу реалізації методу структурної ідентифікації ІДМ здійснюється перевірка «вичерпаності» поточних структур. Усі структури  $\lambda_s^2 \in \Lambda_{mcn}^2$ , для яких здійснюється умова перезавантаження лічильника «вичерпаності структур»:  $Limit_s \geq LIMIT$  (блок 53 на рисунку 2.10), вважаються не перспективними (блок 54 на рисунку 2.10).

Якщо вказана вище умова виконується, то замінюємо поточну структуру «ною» (блок 55 на рисунку 2.10), яку формуємо чисельною реалізацією оператора  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ . Коли для поточних структур знайдено хоч одну, для якої  $\delta(\lambda_s^2) = 0$  (блок 56 на рисунку 2.10), то завершуємо процедуру структурної ідентифікації інтервальної дискретної моделі (блок 57 на рисунку 2.10), в протилежному випадку – повертаємося до фази робочих бджіл (блок 13 на рисунку 2.8).

Необхідно зазначити, що можливість налаштовувати вибір структурних елементів за допомогою методу встановлення ймовірностей для кожного елемента в множині структурних елементів, а також зміна цих ймовірностей на різних етапах ПМБК дозволяє зменшити кількість оцінюваних значень функції мети.

Із використанням реалізованого вище алгоритму побудуємо інтервальні моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів  $\text{NO}_2$  на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича м. Тернопіль. Для отримання даних використано мобільний вимірювальний пост на базі ноутбука та цифрового газового сенсора «SPEC Sensors DGS-NO2 968- 037», який одночасно вимірює температуру та вологість повітря. Вимірювання проводились кожну секунду, і для зменшення впливу випадкових відхилень, які зазвичай мають нормальний розподіл зі середнім значенням нуль, миттєвні вимірювані дані усереднювались протягом 20 хвилин. Одночасно фіксувалася інтенсивність руху автотранспорту. Газовий сенсор мав відносну похибку 15%. Відхилення вимірювань температури та вологості повітря були настільки незначними, що їх можна було проігнорувати. Інтенсивність автотранспортних потоків фіксувалася безпомилково. Фрагмент таблиці результатів вимірювань на вказаному перехресті проілюстровано на рисунку 2.11.

№ спостереження	Час доби	Виміряні концентрації NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>		Інтенсивність транспортного потоку, од.	Відносна вологість повітря, %	Температура повітря, °С
		$C_k^-$	$C_k^+$	$u_{k,1}$	$u_{k,2}$	$u_{k,3}$
0	0:20	0,0336	0,045458	168	73,53	4
1	0:40	0,023263	0,031474	152	73,83	4
2	1:00	0,017822	0,024112	147	73,64	4
3	1:20	0,010728	0,014514	76	73,19	4
4	1:40	0,010074	0,01363	73	73,35	4
5	2:00	0,011038	0,014934	59	73,47	4
6	2:20	0,010648	0,014406	48	72,24	4
7	2:40	0,008484	0,011478	43	71,78	4
8	3:00	0,007548	0,010213	41	71,33	4
9	3:20	0,005784	0,007825	37	71,24	4
10	3:40	0,008973	0,012139	38	70,23	4
11	4:00	0,011821	0,015992	44	69,52	4,19
12	4:20	0,01409	0,019062	36	70,37	4,26
13	4:40	0,017976	0,024321	38	71,21	4,98
14	5:00	0,02388	0,032308	33	71,87	5
15	5:20	0,02226	0,030116	26	71,47	5
16	5:40	0,018508	0,02504	40	70,93	5
17	6:00	0,018267	0,024714	60	70,1	5
18	6:20	0,013492	0,018255	59	70,01	5
19	6:40	0,017039	0,023053	66	70,48	5
...	...	...	...	...	...	...
60	20:20	0,056246	0,076098	468	81,49	2
61	20:40	0,055804	0,0755	252	82,84	2
62	21:00	0,054986	0,074393	234	82,11	2
63	21:20	0,054084	0,073173	201	82,68	2
64	21:40	0,053489	0,072368	247	81,85	2
65	22:00	0,051674	0,069912	243	80,87	2
66	22:20	0,049124	0,066462	252	80,23	2
67	22:40	0,046697	0,063178	231	80,08	2
68	23:00	0,046088	0,062355	254	77,45	2,42
69	23:20	0,044862	0,060695	219	77,99	2
70	23:40	0,044784	0,06059	196	78,33	2
71	0:00	0,044195	0,059793	172	78,14	2

Рисунок 2.11 - Результати вимірювань на перехресті Руська – Замкова – Шашкевича

У результаті проведення ідентифікації моделі із застосуванням вищеописаних процедур, отримано таку структуру та точкові оцінки параметрів моделі динаміки шкідливих викидів автотранспорту в атмосферу:

$$C_k = 0,0365 + 0,3542 \cdot C_{k-1} + 0,118 \cdot C_{k-1} \cdot C_{k-3} + \\ + 0,5059 \cdot C_{k-1} \cdot u_{k,1} / u_{k-1,1} - 0,0154 \cdot C_{k-2} \cdot u_{k-1,1} / u_{k+1,1} \quad (2.32)$$

Отримана математична модель (2.32) відображає динаміку концентрацій  $\text{NO}_2$  на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича м. Тернополя з дискретним значенням часу 20 хвилин. Для її використання достатньо задати початкові значення вимірних концентрацій та інтенсивності автотранспортного потоку. З огляду на те, що зміна значень вологості  $u_{k,2}$  та температури повітря  $u_{k,3}$ , майже не впливає на результати моделювання, у моделі (2.32) враховується лише один з керуючих факторів – інтенсивність  $u_{k,1}$  автотранспортного потоку.

Відповідно, задамо початкові дані для моделювання:  $[C_0]=[0,039489; 0,039569]$ ;  $[C_1]=[0,027341; 0,027396]$ ;  $[C_2]=[0,020946; 0,020988]$ ;  $u_{0,1} = 168$ ;  $u_{1,1} = 152$ ;  $u_{2,1} = 147$ ;  $u_{3,1} = 76$ .

Результати моделювання представлено на рис. 2.12.

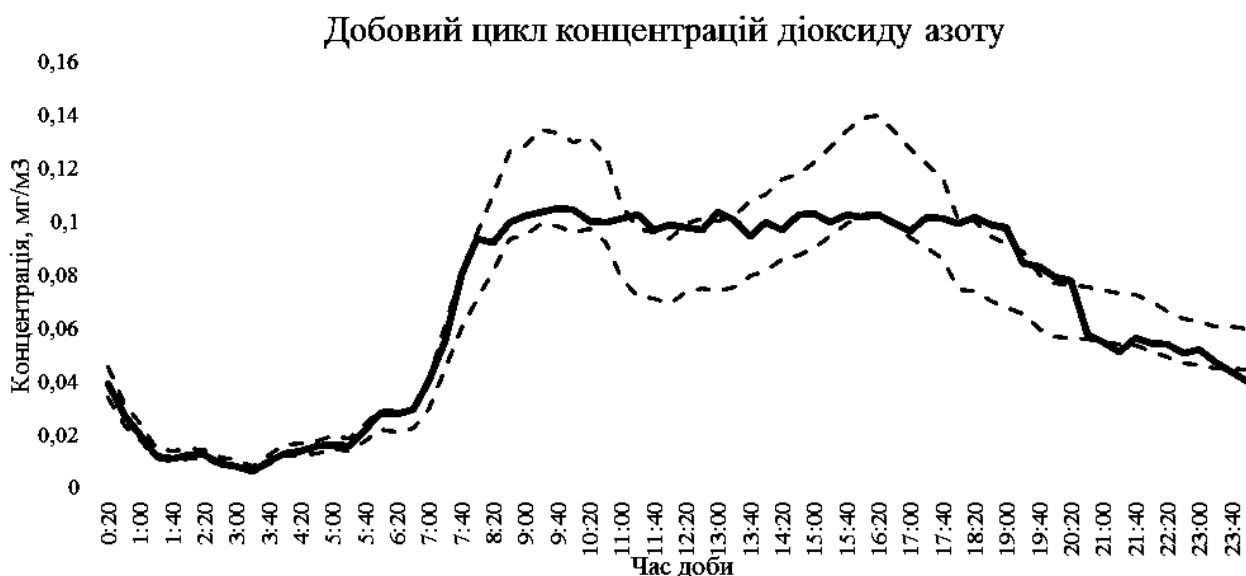


Рис. 2.12. Моделювання динаміки концентрацій викидів  $\text{NO}_2$  автотранспортом

Штриховими лініями зображено інтервали вимірних значень концентрації NO<sub>2</sub>, а суцільними – інтервали прогнозованих значень.

### **2.3. Моделі концентрацій фонових рівнів забруднення навколишнього середовища автотранспортом**

Фонова концентрація – це рівень забруднення навколишнього середовища, на який не впливають локальні джерела, і яка формується протягом довготривалого періоду часу. Дослідження фонового рівня поширення концентрацій забруднення, як репрезентативної постійної концентрації забруднення атмосферного повітря автотранспортом, дає змогу оцінити шкідливий вплив, якому постійно піддається населення. Хоча фонові забруднення повітря не завдають негативного впливу відразу, вони можуть накопичуватися в середовищі і в результаті призводити до погіршення якості повітря і підвищення ризику для здоров'я людей та навколишнього середовища. Тому важливо зменшувати викиди забруднюючих речовин і проводити регулярний моніторинг якості повітря, щоб вчасно виявляти будь-які проблеми і здійснювати необхідні заходи для їх вирішення.

Математичні моделі фонових рівнів концентрацій забруднень, що виникають від автотранспорту в навколишньому середовищі, можуть бути побудовані на основі аналізу даних, спостережень та статистичних методів. Основна мета використання таких моделей: встановлення базових (фонових) рівнів концентрацій забруднюючих речовин від автотранспорту, незалежно від впливу миттєвих викидів. Такі моделі можуть базуватися на різних факторах, таких як географічні характеристики, типи доріг, типи транспортних засобів, погодні умови, інтенсивність транспортного руху тощо. За допомогою інтервального аналізу можна встановити залежності між цими факторами та рівнями концентрацій забруднюючих речовин, що дозволить побудувати інтервальні моделі для прогнозування фонових рівнів. Моделі фонового забруднення повітря дозволяють прогнозувати рівень забруднення повітря, що є важливою задачею для здоров'я людей та екології. Вони використовуються у різних галузях, включаючи охорону

навколишнього середовища, моніторинг забруднення повітря, оцінку впливу забруднення на здоров'я та ризику екологічних катастроф [106].

Моделі фонового забруднення повітря можуть бути використані для розробки стратегій зменшення забруднення повітря та охорони навколишнього середовища. Важливо зазначити, що точність прогнозів залежить від точності вхідних даних та якості моделей, що використовуються.

Моделювання на основі інтервального підходу – це підхід до вирішення задачі урахування невизначеності в моделях даних або систем. Цей підхід є більш реалістичним, оскільки, зазвичай, в реальному житті дані не є точними. Інтервальна модель дозволяє враховувати невизначеність, що може виникати з різних причин, таких як шум, неповнота даних та неврахування всіх чинників [107].

Як правило, причинно-наслідкові зв'язки між спостережуваними характеристиками складних об'єктів та факторами мають нелінійний характер. Їх описують нелінійними, як відносно вхідних змінних, так і параметрів, алгебраїчними рівняннями [108, 109]. Інтервальні моделі поширення фонового (найнижчого) рівня концентрації забруднення внаслідок шкідливих викидів у вихлопних газах автотранспорту запишемо в такому вигляді:

$$C_0(\vec{u}) = f_{m+1}(\vec{\beta}(\vec{u})) \cdot f_1(\vec{u}) + \dots + f_{2m}(\vec{\beta}(\vec{u})) \cdot f_m(\vec{u}), \quad (2.33)$$

де

$C_0(\vec{u})$  – концентрація фонового рівня шкідливих викидів автотранспорту;

$f_1(\vec{u}), \dots, f_m(\vec{u})$  – множина невідомих базисних функцій (відомого класу) для вхідних змінних;

$f_{m+1}(\vec{\beta}(\vec{u})), \dots, f_{2m}(\vec{\beta}(\vec{u}))$  – множина невідомих базисних функцій (відомого класу) для параметрів, значення яких необхідно оцінити;

$\vec{u}$  – вектор значень вхідних змінних, тобто впливаючих факторів;

$m$  – кількість параметрів моделі.

Результати вимірювань отримуємо за умов невизначеності, яку подаємо у



вигляді інтервалів значень [108]:

$$\vec{u}_i \rightarrow [C_i^-; C_i^+], i = 1, \dots, N, \quad (2.34)$$

де

$C_i^-, C_i^+$  – нижня та верхня межі числових інтервалів характеристики, яка моделюється;

$N$  – загальна кількість спостережень.

Слід зауважити, що інтервальна форма подання результатів експерименту (2.34) пов'язана із наявними похибками вимірювань  $Y$  концентрації фонових рівнів забруднень певного виду. В методах аналізу інтервальних даних, головне припущення в тому, щоб ця похибка була з обмеженими значеннями, які є відомими.

У інтервальному аналізі умови узгодженості моделі з інтервальними даними вимірювань задають у такому вигляді [107]:

$$C_0(\vec{X}_i) \in [C_i^-; C_i^+], i = 1, \dots, N, \quad (2.35)$$

де

$C_0(\vec{X}_i)$  – означає істинне невідоме значення концентрації фонових рівнів шкідливих викидів для фіксованих значень входних змінних  $\vec{u}_i$ .

При побудові моделей розв'язують задачу параметричної ідентифікації для заданої структури інтервальної моделі. Перебір структур відбувається на основі еволютивних алгоритмів, зокрема на основі ПМБК. Невідомими в цьому випадку залишаються тільки значення параметрів моделі  $\vec{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_m)$ . Базуючись на умові «гарантованості» (2.35) та виразу (2.33) для значень входних змінних  $\vec{X}_i$  в  $i$ -й точці спостереження, формуємо систему інтервальних нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР), які є одночасно двосторонніми нерівностями:

$$\begin{cases} C_1^- \leq f_{m+1}(\vec{\beta}(\vec{u}_1)) \cdot f_1(\vec{u}_1) + \dots + f_{2m}(\vec{\beta}(\vec{u}_1)) \cdot f_m(\vec{u}_1) \leq C_1^+; \\ \vdots \\ C_i^- \leq f_{m+1}(\vec{\beta}(\vec{u}_i)) \cdot f_1(\vec{u}_i) + \dots + f_{2m}(\vec{\beta}(\vec{u}_i)) \cdot f_m(\vec{u}_i) \leq C_i^+; \\ \vdots \\ C_N^- \leq f_{m+1}(\vec{\beta}(\vec{u}_N)) \cdot f_1(\vec{u}_N) + \dots + f_{2m}(\vec{\beta}(\vec{u}_N)) \cdot f_m(\vec{u}_N) \leq C_N^+. \end{cases} \quad (2.36)$$

Як відомо [109,110], методи розв'язку цієї ІСНАР (4) на основі методів аналізу інтервальних даних є достатньо складними, оскільки сама область розв'язків може бути неопуклою та навіть розірваною.

Проте, для побудови хоча б однієї інтервальної моделі достатньо обчислити один розв'язок ІСНАР (4). У цьому випадку інтервальну модель (2.33) на основі точкового розв'язку запишемо у вигляді:

$$\hat{C}(\vec{X}) = f_{m+1}(\vec{\beta}(\vec{u})) \cdot f_1(\vec{u}) + \dots + f_{2m}(\vec{\beta}(\vec{u})) \cdot f_m(\vec{u}). \quad (2.37)$$

Для оцінювання одного розв'язку ІСНАР (4) використовують ітераційні оптимізаційні обчислювальні процедури [108]. При цьому якість отриманих оцінок параметрів визначають за допомогою функції мети  $\delta(\vec{\beta}(\vec{u}))$ . У роботах [108, 109] обґрунтовано вираз для цієї функції. Для ідентифікації та навчання інтервальних математичних моделей фонових рівнів концентрацій забруднень внаслідок шкідливих викидів автотранспорту використаємо методи поведінкових моделей бджолоїної колонії.

Проведемо моделювання фонового рівня концентрації діоксиду азоту, який виникає внаслідок шкідливих викидів у вихлопних газах автотранспорту в центральній частині міста Тернополя на кільцевій дорозі, до якої прилягають вулиці С. Крушельницької, Збаразька, Бродівська та Галицька.

Для вимірювань експериментальних даних використовувався комплекс вимірювання концентрації діоксиду азоту на основі модуля Sniffer4D Hyper-local, який мав встановлений датчик вимірювання діоксиду азоту та телеметрійний

підмодуль для передачі даних до базової станції у вигляді персонального комп'ютера з встановленим стандартним програмним забезпеченням Sniffer4D Mapper [106]. Сам модуль був встановлений на борту мобільної системи – квадрокоптера DJI M100. Вимірювання проводились на висоті  $h = 1,5$  метра від дорожнього покриття на ділянці розміром 32,4328 метра на 32,4328 метра з дискретизацією заданої області на 20 точок для кожної координати. Результати вимірювання фонового рівня концентрацій діоксиду азоту  $\text{NO}_2$  наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Дані вимірювання фонового рівня концентрацій діоксиду азоту  $\text{NO}_2$ 

i, j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	20.2	20.7	20.2	19.7	20.7	19.7	19.7	21.2	20.2	19.7	21.2	19.7	19.3	19.7	19.7	20.7	20.2	20.2	20.7	21.2
2	20.7	21.2	22.1	22.6	23.5	24.4	25.9	26.3	26.3	27.3	27.7	27.7	27.7	29.1	28.7	28.7	29.1	28.7	29.6	29.1
3	28.7	29.1	28.7	28.2	29.1	29.6	28.7	29.1	28.7	28.7	29.1	28.7	28.2	28.7	27.7	27.3	28.2	27.7	27.7	27.7
4	27.7	28.2	27.3	27.3	28.7	27.7	27.7	28.2	28.2	27.7	27.7	27.7	27.3	28.2	27.3	27.3	28.2	27.3	26.8	27.3
5	26.8	27.3	28.2	29.1	30.6	30.6	30.6	32	32.4	32.4	34.3	34.8	35.3	36.2	35.3	35.3	36.2	36.2	37.1	37.6
6	38.1	39	39	40.4	40.9	41.4	41.8	42.8	42.8	42.8	43.7	44.2	44.2	44.7	44.7	44.2	44.7	45.1	44.2	45.1
7	43.3	42.8	43.7	42.8	41.8	42.8	41.8	41.4	41.8	40.4	41.4	41.8	40.9	41.8	42.3	42.3	44.7	44.7	46.1	47.5
8	48.4	49.8	50.8	50.8	51.2	52.2	52.2	52.2	53.6	53.6	53.6	53.6	53.1	54.1	53.1	52.7	54.1	53.1	52.7	53.1
9	53.1	53.1	52.7	52.2	52.2	52.2	51.7	51.7	52.2	52.2	52.2	52.7	51.7	51.2	50.8	49.8	50.3	49.4	48.4	49.4
10	48.4	47.5	48	48.9	48.9	48.9	48.4	48.9	49.8	49.4	49.8	50.3	50.3	51.2	52.2	51.7	51.7	52.7	54.1	55.9
11	55.9	56.9	59.7	60.2	61.1	64.9	66.3	68.6	71.5	72.9	76.2	79	79	79.9	82.7	82.7	83.2	84.6	84.2	84.2
12	84.2	84.2	85.1	84.2	83.7	84.6	83.7	83.2	83.2	83.7	82.7	82.3	82.3	81.3	80.9	79.9	79.5	79.5	78.5	78
13	78.5	77.6	77.6	75.7	75.2	75.2	74.8	74.3	74.3	73.3	72.9	73.3	71.9	71.5	70.1	68.6	68.2	68.6	65.8	64.9
14	64.9	63.9	63	63	62.1	61.1	60.6	60.6	61.6	60.6	59.7	60.2	60.2	59.2	60.2	59.7	59.2	59.2	58.8	58.8
15	59.2	58.8	58.3	58.3	57.4	57.4	56.9	56.4	55	54.5	54.5	54.5	53.1	52.2	52.7	52.2	50.3	50.8	50.8	48.9
16	48.9	48.4	47.5	47.5	46.5	46.1	46.5	45.6	46.1	47.5	47	46.1	46.5	45.1	46.1	45.1	44.2	45.1	44.2	43.7
17	43.7	43.7	42.3	41.8	41.4	40.9	40.9	40.4	40.4	40	39.5	38.6	39.5	39	38.6	38.6	38.1	39.5	38.6	37.6
18	39	39	38.6	38.1	39	38.1	38.1	38.6	39	40	39	38.6	39.5	39	39	39	39.5	39	39	38.6
19	39	40	39.5	39.5	40	40	40	40.9	40.4	40	40.9	40.9	41.4	41.8	41.8	42.8	42.3	41.8	42.3	42.8
20	42.8	44.2	45.1	45.6	48	48.4	48.9	51.2	51.2	51.2	52.7	52.2	51.7	51.7	51.7	52.2	51.7	51.7	52.7	52.2

Для побудови інтервальної моделі розподілу фонового рівня концентрацій діоксиду азоту в заданій області необхідно вирішити завдання параметричної ідентифікації цієї моделі з використанням методу структурної ідентифікації на основі поведінкової моделі колонії бджіл.

Отримали адекватну модель на основі структури:

$$\hat{C}(\vec{u}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot u_1 + \beta_2 \cdot u_2 + \beta_3 \cdot u_1^2 + \beta_4 \cdot u_2^2 + \beta_5 \cdot u_2^3 +$$

$$\beta_6 \cdot u_2^4 + \beta_7 \cdot u_2^5 + \beta_8 \cdot u_3, \quad (2.38)$$

де

$u_1$  – координата точки вимірювання по  $i$ ;

$u_2$  – координата точки вимірювання по  $j$ ;

$u_3$  – інтенсивність руху транспорту;

$$\vec{\beta} = (6,951 \ 0,2555 \ 16,38 \ -0,007792 \ -5,391 \ 0,8706 \ -0,05633 \ 0,001225 \ 0,5054).$$

У результаті обчислень на основі одержаної моделі було побудовано оцінки фонового рівня концентрації діоксиду азоту та побудовано одновимірний графік, який показано на рис. 2.13. На рис. 2.13 показано результати прогнозування розподілу фонового рівня концентрацій діоксиду азоту на основі моделі (2.38) (синя лінія) і їх порівняння з експериментальними даними вимірювань (червона та жовта лінії).

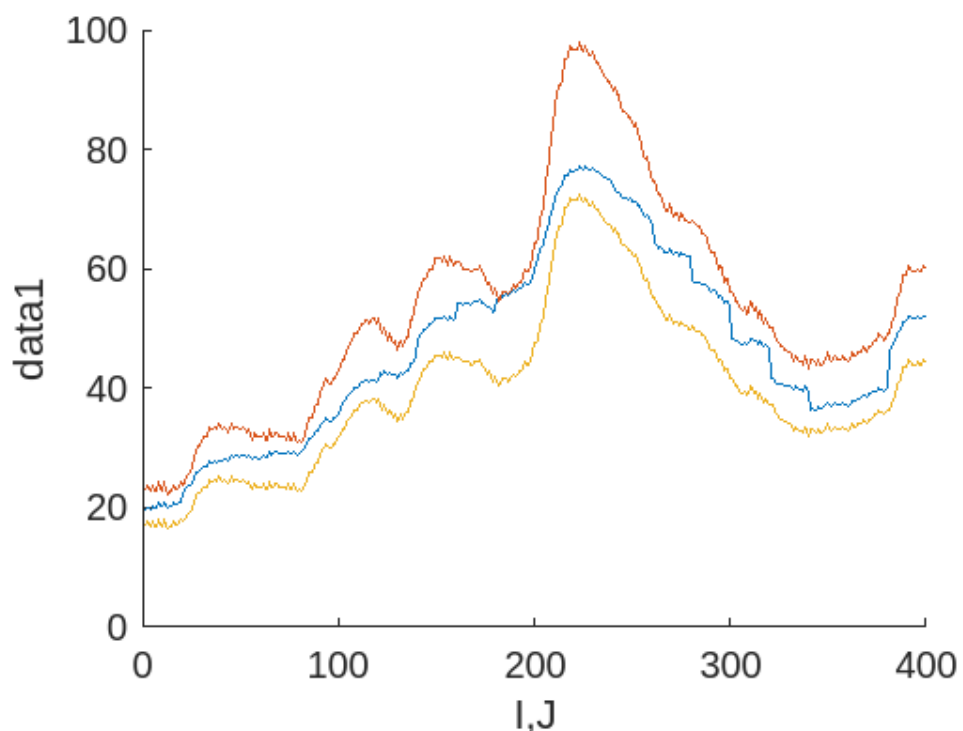


Рис. 2.13. Прогнозований розподіл концентрацій фонового рівня діоксиду азоту на основі моделі (2.38) (двовимірне представлення)

На рис. 2.14 показано результати прогнозування розподілу фонового рівня

концентрацій діоксиду азоту на основі моделі (2.38) у тривимірному просторі та їх порівняння з експериментальними даними вимірювань (сіткоподібна поверхня).

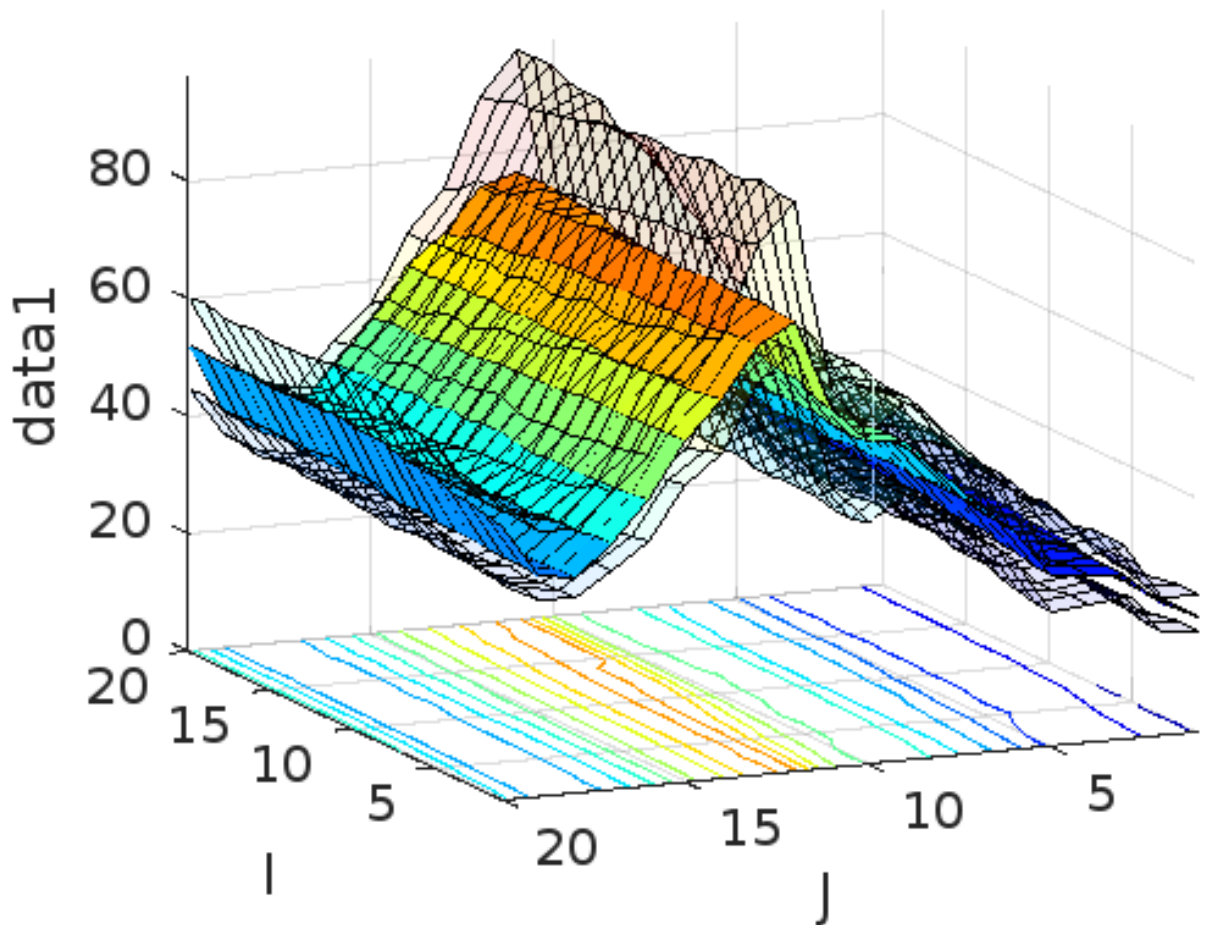


Рис. 2.14 Прогнозований розподіл концентрацій фонового рівня діоксиду азоту на основі моделі (2.38) (тривимірне представлення)

Для наочності та зручності використання прогнозованого розподілу фонового рівня концентрацій діоксиду азоту на основі моделі (2.38) на рис. 2.15 наведено тривимірний графік з ізолініями. Таке представлення результатів моделювання зручно використовувати для накладання поверхні на реальну карту з метою відображення опосередкованого впливу на забруднення ґрунтів та його оцінювання із використанням моделі дифузії, яку було запропоновано у пункті 2.1.

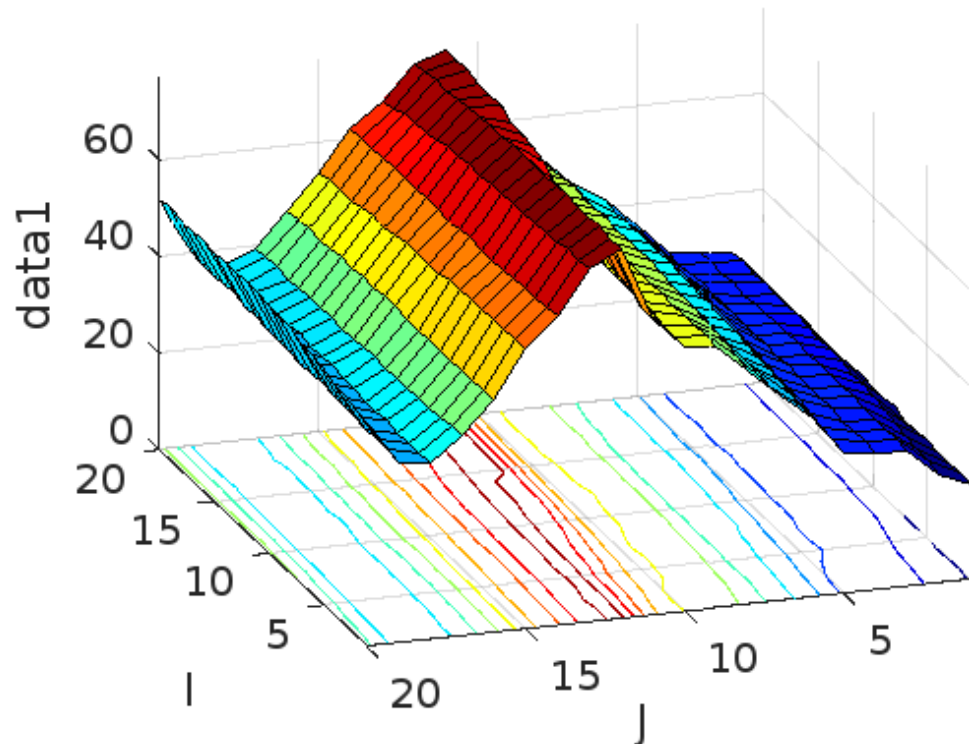


Рис. 2.15. Прогнозований розподілу концентрацій фонового рівня діоксиду азоту на основі моделі (2.38) (тривимірний графік з ізолініями)

Як демонструє рисунок 2.15, отримана модель забезпечує розрахунок фонового рівня концентрації діоксиду азоту з вказаною точністю, що відповідає умові (2.35), тобто її можна вважати адекватною. Однак, прогностичні властивості отриманої моделі потребують перевірки. Для цього необхідно незначно змінити умови її використання. Як вже зазначалося, отримана математична модель відтворює розподіл концентрації фонового рівня діоксиду азоту, який викликаний шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту в заданій центральній частині міста Тернополя на кільцевій дорозі. Для перевірки моделі ми використали результати вимірювань наступного дня. Відповідно, умови події були також трохи іншими.

Виміри проводилися на висоті  $h = 1,5$  метра від ґрунту на ділянці площею 32,43 метра на 32,43 метра (1051,883 квадратних метра) з дискретизацією даної області 20 точок для кожної координати.

Результати експерименту у вигляді вимірних концентрацій фонового рівня діоксиду азоту наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Дані повторного вимірювання фонового рівня концентрацій  
діоксиду азоту NO<sub>2</sub>

ij	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	20.2	20.7	20.2	19.7	20.7	19.7	19.7	21.2	20.2	19.7	21.2	19.7	19.3	19.7	19.7	20.7	20.2	20.2	20.7	21.2
2	20.7	21.2	22.1	22.6	23.5	24.4	25.9	26.3	26.3	27.3	27.7	27.7	27.7	29.1	28.7	28.7	29.1	28.7	29.6	29.1
3	28.7	29.1	28.7	28.2	29.1	29.6	28.7	29.1	28.7	28.7	29.1	28.7	28.2	28.7	27.7	27.3	28.2	27.7	27.7	27.7
4	27.7	28.2	27.3	27.3	28.7	27.7	27.7	28.2	28.2	27.7	27.7	27.7	27.3	28.2	27.3	27.3	28.2	27.3	26.8	27.3
5	26.8	27.3	28.2	29.1	30.6	30.6	30.6	32	32.4	32.4	34.3	34.8	35.3	36.2	35.3	35.3	36.2	36.2	37.1	37.6
6	38.1	39	39	40.4	40.9	41.4	41.8	42.8	42.8	42.8	43.7	44.2	44.2	44.7	44.7	44.2	44.7	45.1	44.2	45.1
7	43.3	42.8	43.7	42.8	41.8	42.8	41.8	41.4	41.8	40.4	41.4	41.8	40.9	41.8	42.3	42.3	44.7	44.7	46.1	47.5
8	48.4	49.8	50.8	50.8	51.2	52.2	52.2	52.2	53.6	53.6	53.6	53.6	53.1	54.1	53.1	52.7	54.1	53.1	52.7	53.1
9	53.1	53.1	52.7	52.2	52.2	52.2	51.7	51.7	52.2	52.2	52.2	52.7	51.7	51.2	50.8	49.8	50.3	49.4	48.4	49.4
10	48.4	47.5	48	48.9	48.9	48.9	48.4	48.9	49.8	49.4	49.8	50.3	50.3	51.2	52.2	51.7	51.7	52.7	54.1	55.9
11	55.9	56.9	59.7	60.2	61.1	64.9	66.3	68.6	71.5	72.9	76.2	79	79	79.9	82.7	82.7	83.2	84.6	84.2	84.2
12	84.2	84.2	85.1	84.2	83.7	84.6	83.7	83.2	83.2	83.7	82.7	82.3	82.3	81.3	80.9	79.9	79.5	79.5	78.5	78
13	78.5	77.6	77.6	75.7	75.2	75.2	74.8	74.3	74.3	73.3	72.9	73.3	71.9	71.5	70.1	68.6	68.2	68.6	65.8	64.9
14	64.9	63.9	63	63	62.1	61.1	60.6	60.6	61.6	60.6	59.7	60.2	60.2	59.2	60.2	59.7	59.2	59.2	58.8	58.8
15	59.2	58.8	58.3	58.3	57.4	57.4	56.9	56.4	55	54.5	54.5	54.5	53.1	52.2	52.7	52.2	50.3	50.8	50.8	48.9
16	48.9	48.4	47.5	47.5	46.5	46.1	46.5	45.6	46.1	47.5	47	46.1	46.5	45.1	46.1	45.1	44.2	45.1	44.2	43.7
17	43.7	43.7	42.3	41.8	41.4	40.9	40.9	40.4	40.4	40	39.5	38.6	39.5	39	38.6	38.6	38.1	39.5	38.6	37.6
18	39	39	38.6	38.1	39	38.1	38.1	38.6	39	40	39	38.6	39.5	39	39	39	39.5	39	39	38.6
19	39	40	39.5	39.5	40	40	40	40.9	40.4	40	40.9	40.9	41.4	41.8	41.8	42.8	42.3	41.8	42.3	42.8
20	42.8	44.2	45.1	45.6	48	48.4	48.9	51.2	51.2	51.2	52.7	52.2	51.7	51.7	51.7	52.2	51.7	51.7	52.7	52.2

Відповідно, базуючись на отриманій моделі розподілу концентрації фонового рівня діоксиду азоту, у формі (2.38), було прогнозовано розподіл концентрації фонового діоксиду азоту в тих же дискретних точках і порівняно результати прогнозу з експериментальними даними, наведеними в таблиці 2.2. На рисунку 2.16 показано результати прогнозування на основі отриманої моделі та їх порівняння з експериментальними даними у двовимірному випадку.

Аналогічно на рис. 2.16 показано результати прогнозування розподілу концентрацій фонового рівня діоксиду азоту на основі моделі (2.38) та даних, отриманих внаслідок повторних вимірювань у тривимірному просторі та їх порівняння з експериментальними даними вимірювань (сіткоподібна поверхня).

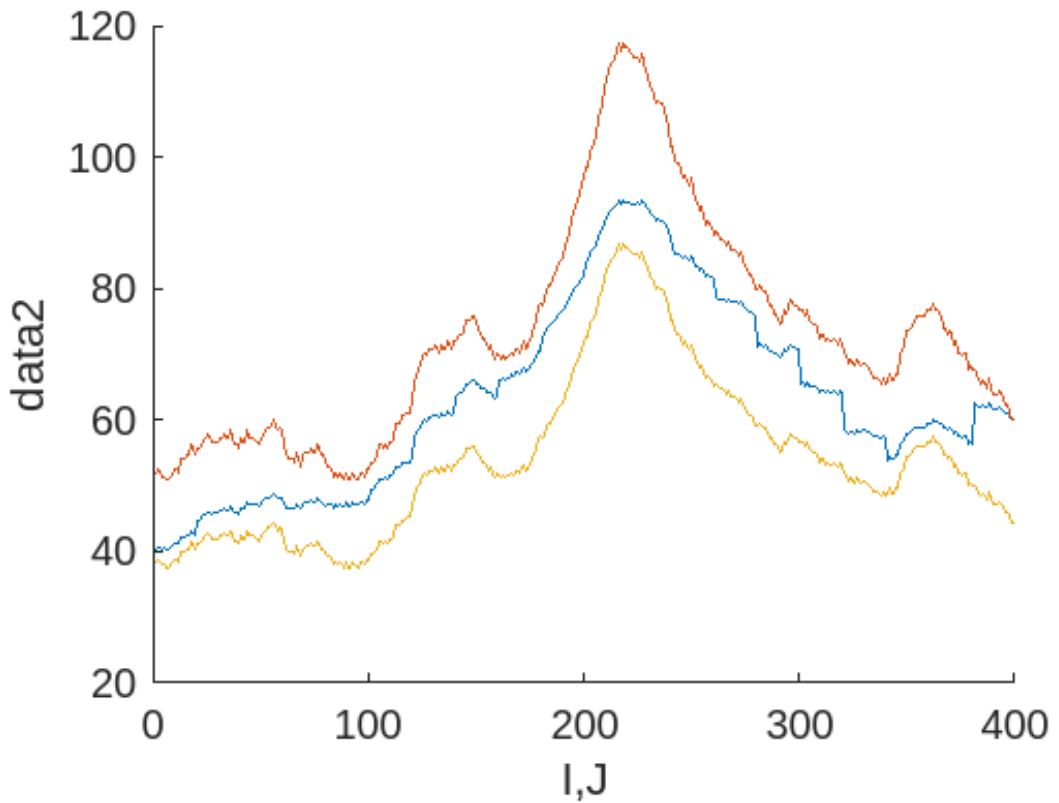


Рис. 2.16. Прогнозований розподіл концентрацій фонового рівня діоксиду азоту на основі моделі (2.38) для даних 2(двовимірне представлення)

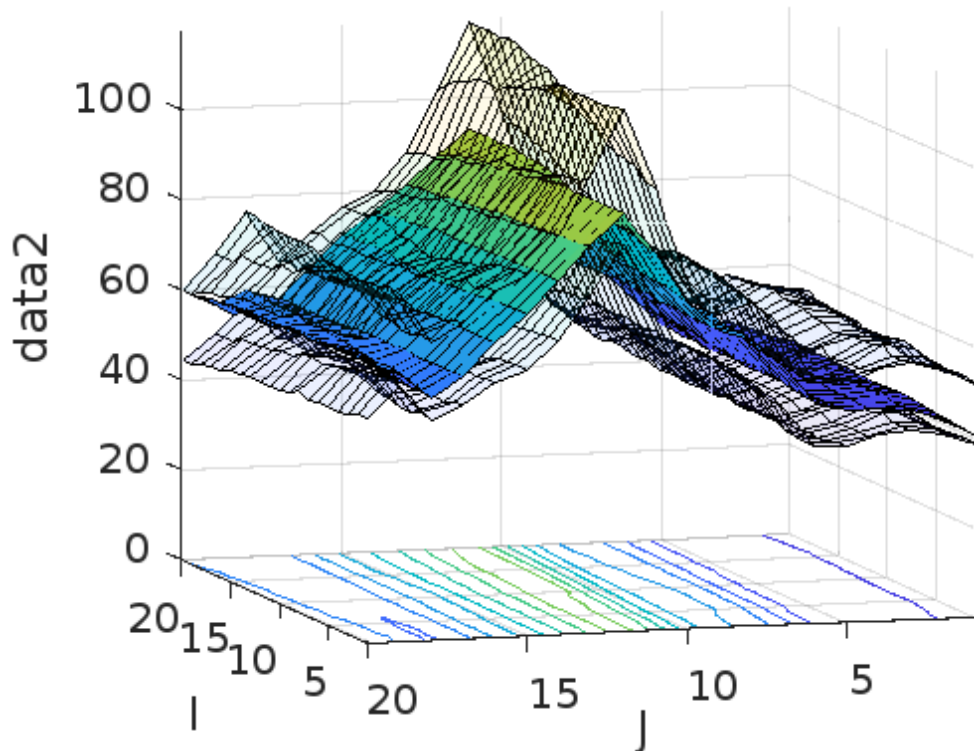


Рис. 2.17 Прогнозований розподіл концентрацій фонового рівня діоксиду азоту на основі моделі та повторних вимірювань (2.38) (тривимірне представлення)



На рис. 2.18 наведено тривимірний графік з ізолініями для повторних вимірювань.

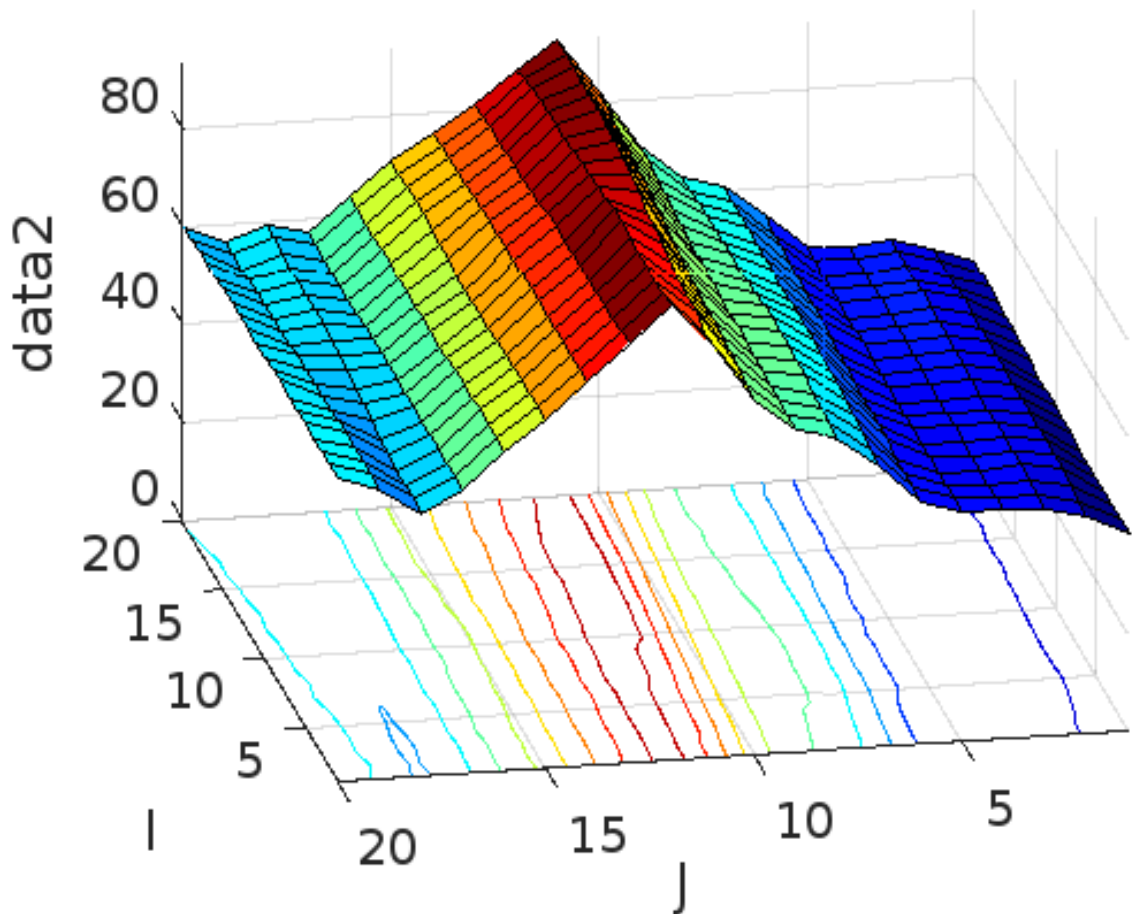


Рис. 2.18. Прогнозований розподіл концентрацій фонового рівня діоксиду азоту на основі моделі (2.38) та повторних вимірювань (тривимірний графік з ізолініями)

Як бачимо, для всіх дискретних значень прогнозовані концентрації діоксиду азоту належать до інтервалів, отриманих експериментально. Таким чином, за вказаних умов отримана модель розподілу концентрацій фонового рівня діоксиду азоту має достатню прогностичну точність для прогнозу меж концентрації діоксиду азоту незалежно від змін в умовах застосування моделі для оцінки забруднення ґрунтів шкідливими викидами автотранспорту.

## Висновки до розділу 2

1. У розділі розроблено математичне забезпечення для моделювання процесів забруднення довкілля шкідливими викидами автотранспорту. В його основу входять моделі дифузії, які мають вигляд диференціальних рівнянь, що враховують фізичні процеси, такі як дифузія і хімічні реакції, інтервальні моделі динаміки та фонових рівнів концентрації шкідливих викидів автотранспорту в атмосфері.

2. Побудовано математичну модель дифузії концентрації шкідливих викидів автотранспорту в ґрунтах, яка уможливує прогнозування поширення концентрацій забруднень вглиб від поверхні ґрунту в кожній точці спостереження на поверхні.

3. У результаті проведених обчислень побудовано розподіл концентрацій забруднень для ґрунту та води в околах окремих точок спостережень, а також розподіл концентрацій забруднень в околах пари точок спостережень підсистем типу водойма-узбережжя. На основі отриманих концентрацій з мобільного вимірювального комплексу, де спостерігалися найбільші, найменші та медіанні значення концентрації забруднень в приземистому шарі атмосфери, змодельовано розподіл концентрацій забруднень ґрунту в околі точок вимірювань. Встановлено, що значимі проникнення забруднень в газоподібному стані припиняються практично на глибині 10 сантиметрів.

4. Для забезпечення побудови розподілу концентрації шкідливих викидів автотранспорту в ґрунтах на визначених ділянках побудовано математичну моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту в атмосферу. Отримана модель динаміки забруднень на основі заданих точок вимірювань має високі прогностичні властивості та уможливує прогнозування концентрації забруднень в інших точках. Для її використання достатньо задати значення виміряних концентрацій та інтенсивності автотранспортного потоку, які визначають початкові умови вимірювань.

5. Для встановлення фонових (найнижчих) рівнів концентрацій

забруднюючих речовин від автотранспорту, незалежно від впливу миттєвих викидів, побудовано інтервальну модель розподілу фонового рівня концентрації діоксиду азоту. Для навчання та верифікацій моделей було використано методи інтервального аналізу та еволютивні алгоритми на основі поведінкових моделей бджолої колонії. Використання такого підходу забезпечило високі прогностичні властивості та гарантовану точність отриманих моделей 15%, що визначається похибками давачів вимірювань.

### **РОЗДІЛ 3**

## **АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ У ВИХЛОПНИХ ГАЗАХ АВТОТРАНСПОРТУ**

У розділі описано особливості побудови архітектури програмного забезпечення для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

Описано технологію створення програмної системи з використанням окремого блоку вимірювань, математичного моделювання та відповідного накопичування результатів.

Представлено ряд діаграм, які відображають особливості використання системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту та описано ключові аспекти інтерпретації результатів моделювання в прикладних сферах, зокрема в задачах екологічного моніторингу.

### **3.1 Підсистема вимірювань концентрації шкідливих викидів автотранспорту**

Система моніторингу забруднення шкідливими речовинами, ґрунтується на апаратно-програмному забезпеченні[111,112]. Це дозволяє проводити вимірювання концентрації шкідливих викидів на певній території в автономному режимі та зберігати та обробляти дані. Головною метою цього є ідентифікація та навчання математичних інтервальних моделей поширення концентрацій шкідливих викидів.

На рисунку 3.1 представлено загальний вигляд архітектури системи[113]. Дана система складається з чотирьох незалежних модулів, які взаємодіють між собою, використовуючи різні технології. Базовим елементом для моніторингу концентрацій діоксиду азоту було обрано блок Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer, в середину якого інстальовано сенсор для вимірювання діоксиду азоту та

підключено модуль телеметрії. Для обміну даними між сенсором та сервісом управління даних на комп'ютері інстальовано програмне забезпечення Sniffer4D Mapper, яке дає можливість не тільки здійснювати попередню обробку телеметричних даних та запис їх в базу даних, але й візуалізувати результати вимірювань в реальному часі. Дані між модулями передаються по протоколу TCP/IP, який забезпечує достатню швидкість обміну великих об'ємів інформації.

Згідно з наведеною архітектурою, результати вимірювань в режимі реального часу передаються в підсистему для моделювання, де приводяться до інтервального вигляду та зберігаються в БД. Дані вимірювань концентрації забруднення повітря представлені у вигляді наборів, отриманих у інтервальному вигляді за рахунок наявності похибок вимірювань[114-119].

Завдяки використанню CRUD операції сервіс управління даними взаємодіє з модулем зберігання даних, який знаходиться на рівні даних, тим самим забезпечуючи швидкий обмін інформацією між рівнем бізнес-логіки та базою даних[120-123]. У якості системи управління базою даних було обрано MS SQL Server, який підтримує реляційну модель даних, що, в свою чергу, полегшує роботу з організацією вимірюваних даних.

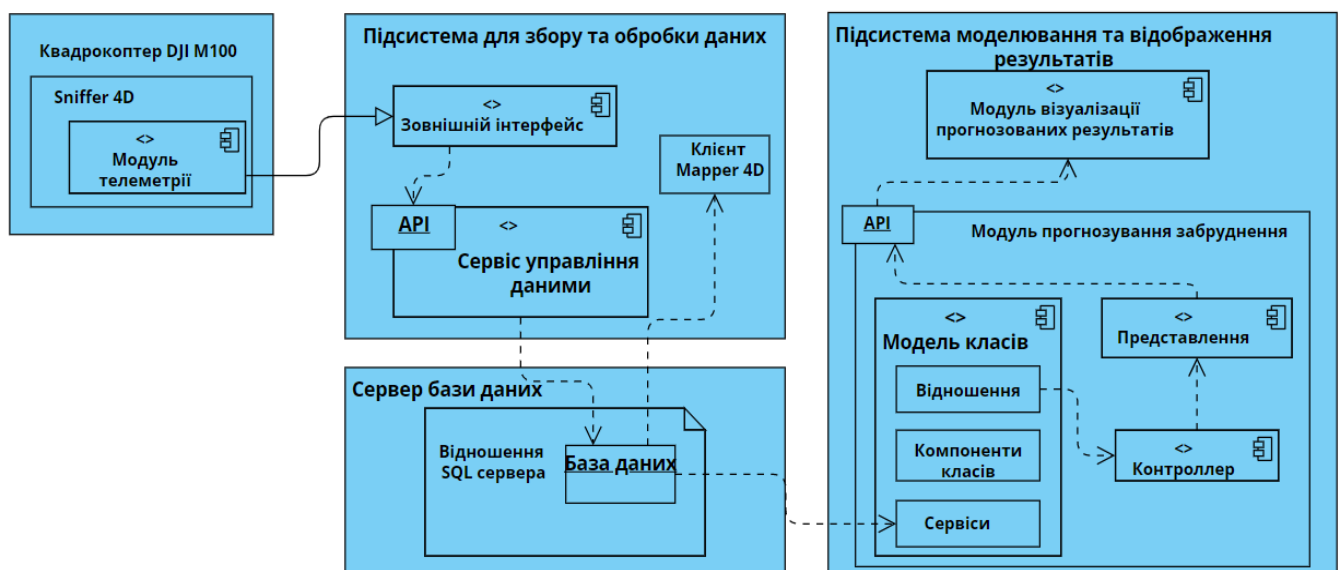


Рис. 3.1 – Загальна архітектура системи моніторингу

Відповідно, апаратне забезпечення системи це – вимірювальний модуль (в складі Sniffer4D, який встановлений на квадрокоптері, станції підзарядки квадрокоптера та підмодуля телеметрії для передачі даних) і робоча станція, побудована на основі комп'ютера, до якого підключено адаптер телеметрії для отримання по радіоканалу даних з вимірювального модуля. Дані між модулями передаються по протоколу TCP/IP, який забезпечує швидкий обмін великих об'ємів інформації.

Розглянемо безпосередньо вимірювальний аеромобільний комплекс. На рисунку 3.2 проілюстровано загальну інтеграцію сенсору Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer sensors з квадрокоптером DJI M100.

Як зазначено в розділі 1 – наявність системи автоматичного калібрування є однією з основних переваг цього сенсорного блоку, який також має інші переваги, такі як висока точність вимірювання, широкий діапазон робочих температур, швидкий час реакції та тривалий термін роботи.



Рис. 3.2. Інтеграція блоку Sniffer4D з квадрокоптером DJI M100

Для організації передачі даних між мобільною системою та базовою станцією, де зберігаються результати вимірювань, необхідно виконати деякі налаштування блоку Sniffer4D. Перш за все, потрібно підключити модуль GPS до головного блоку за допомогою роз'єму micro USB і телеметричну антену до антенного порту пристрою за допомогою подовжувача.

Результат встановлення блоку Sniffer4D на квадрокоптер показано на рисунку 3.3. Зокрема, фіксація блоку підключення блоку живлення через порт XT30U до основного джерела живлення квадрокоптера.

На рисунку 3.4 зображено модуль телеметрії (приймач), який підключено до комп'ютера. Такий самий модуль використовує і блок Sniffer4D. Для роботи з даним комплексом встановлено програмне забезпечення Sniffer4D Mapper на персональному комп'ютері станції для передачі даних між блоком Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer і базовою станцією.



Рис. 3.3. Підключений блок Sniffer4D до джерела живлення квадрокоптера

Це дозволяє не тільки попередньо обробляти телеметричні дані та зберігати

їх у базі даних, а й візуалізувати та оцінювати результати вимірювань у реальному часі.



Рис. 3.4. Підключений модуль телеметрії робочої станції

Далі розглянемо детальніше станцію підзарядки (рисунок 3.5). У Західноукраїнському національному університеті в рамках науково-дослідного проєкту кафедри комп'ютерних наук створено мінісонячну електростанцію потужністю 570 Вт. Розроблена установка використовується як інтелектуальний модуль для перезарядки квадрокоптера DJI Matrix на базі аеромобільного комплексу для моніторингу забруднення навколишнього середовища в місті Тернопіль[124,125].

Сонячна електростанція, встановлена в 6 навчальному корпусі, складається з 2 фотомодулів максимальною потужністю 285 Вт кожен. Процес відновлення та використання заряду електростанції характеризується певними особливостями. Небажані коливання струму та напруги можуть призвести до серйозних несправностей. З метою запобігання таким проблемам, в системі використовується контролер заряду. Як видно з рисунку 5 фотоелектричні модулі під'єднано через перемикач Nager MC 263A до контролера, який виконує функції управління процесами заряду та розряду батареї. Батарея типу AGM ємністю 100Ah також



через комутатор Hager MC 263A під'єднана до зазначеного контролера.

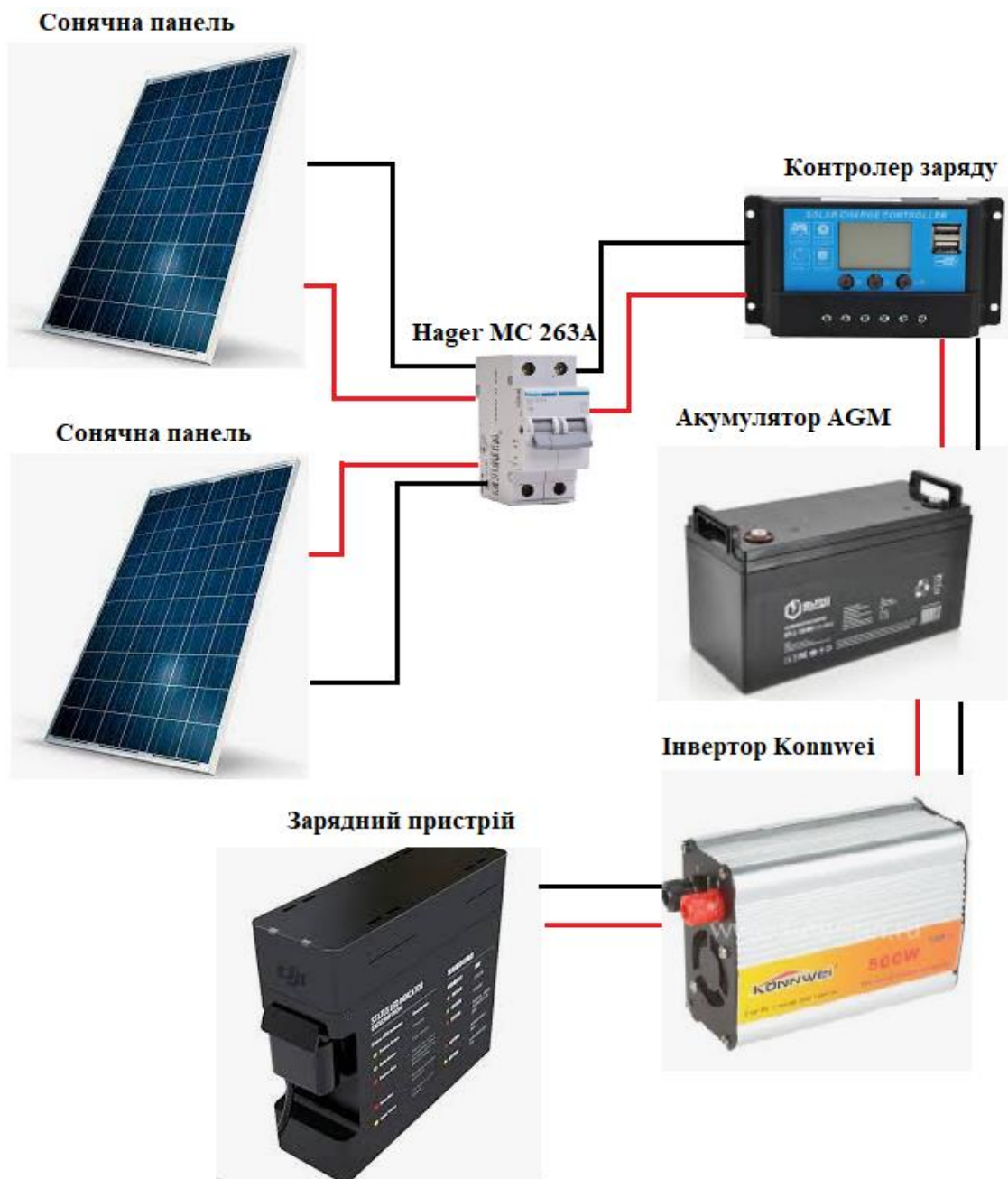


Рис. 3.5. Структура апаратного забезпечення системи підзарядки

Для перетворення електроенергії від акумулятора, підключеного до паралельного інвертора з наступними характеристиками:

- віддача – 1000Вт;
- вхідна напруга – 12В;
- вихідна напруга – 220В.

Таким чином, описана система містить усі необхідні компоненти для отримання електроенергії від сонячних батарей та використовується як джерело автономного живлення для аеромобільного вимірювального комплексу. В цілому, така система забезпечує незалежне живлення, що дозволяє працювати у автономному режимі. Використання сонячної енергії дозволяє забезпечити стабільне та екологічно чисте джерело електроенергії для вимірювального аеромобільного комплексу.

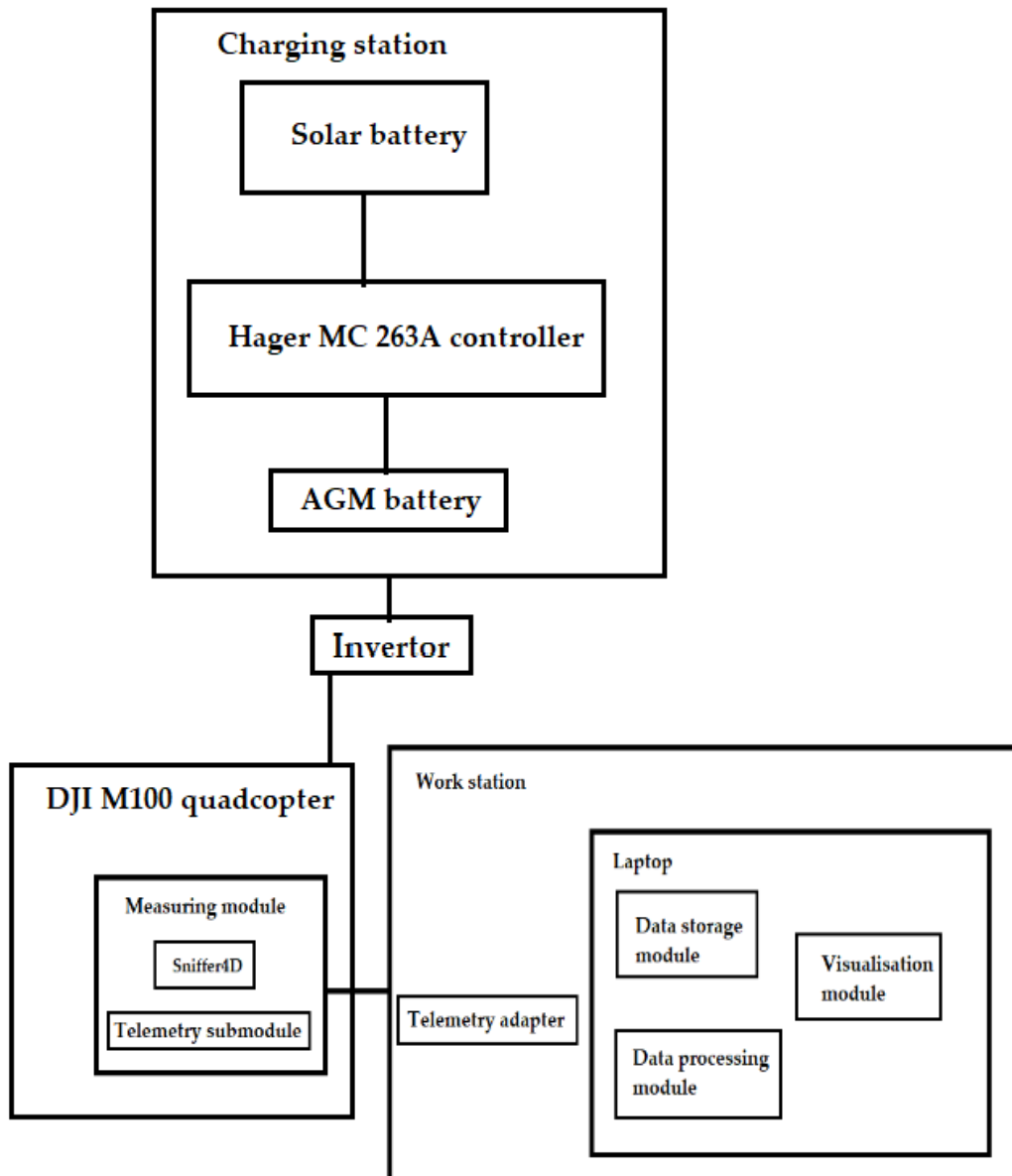


Рис. 3.6. Загальна структура системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами автотранспорту

Слід зазначити, що попередні дослідження показали, що кількість виробленої електроенергії істотно залежить від освітлення сонячних панелей. Зокрема, у випадку високої хмарності кількість виробленої енергії зменшується до 5% від загальної потужності сонячної електростанції. У разі високої інсоляції було досягнуто до 200 Вт генерованої електроенергії. Це дозволяє автономно заряджати батарею TB48D для аеромобільного вимірювального комплексу у вигляді квадрокоптера DJI M100 та блоку датчиків Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer.

На рисунку 3.7. представлено узагальнену діаграму компонентів, яка відображає основні взаємодіючі процеси, які реалізовано в рамках роботи мобільного комплексу для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

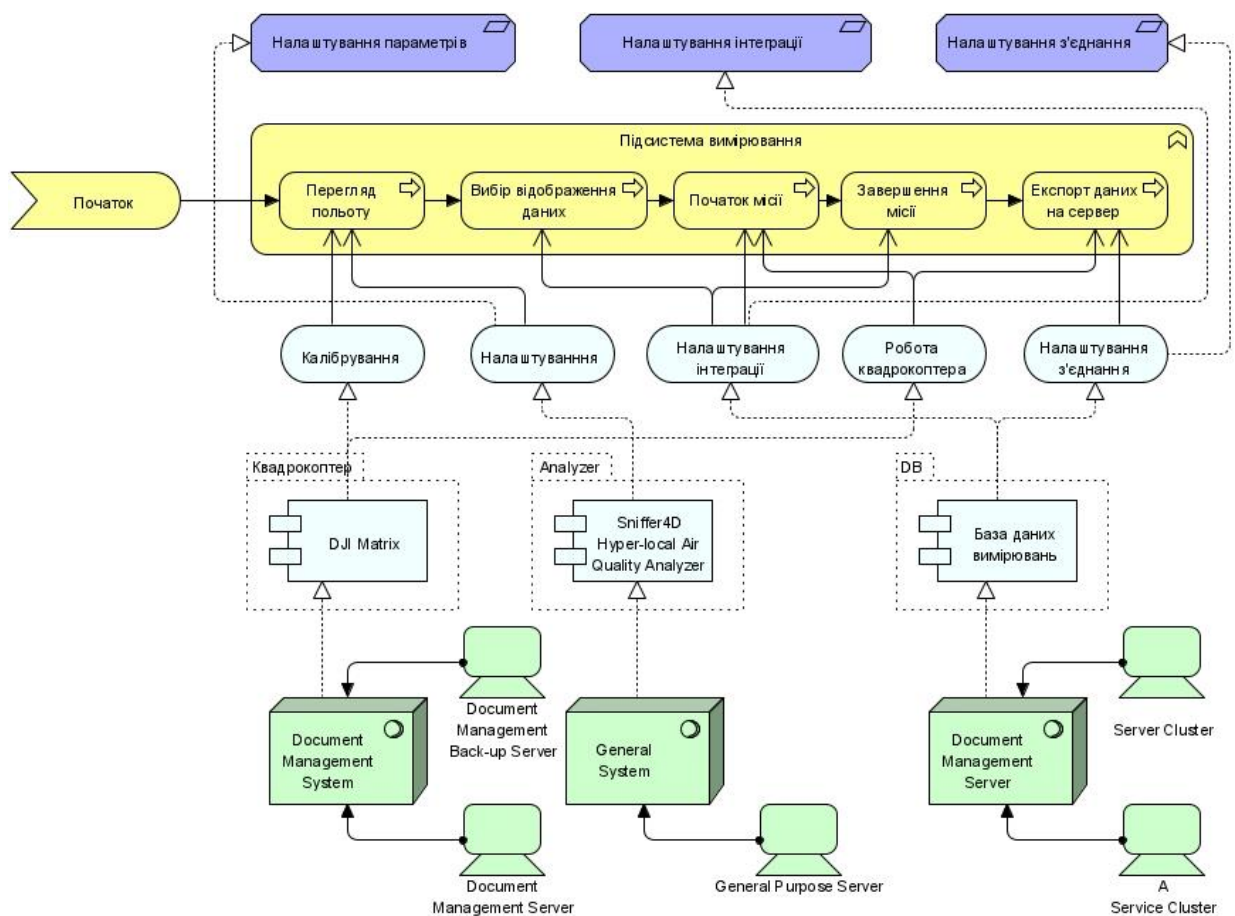


Рис. 3.7. Загальна діаграма компонентів підсистеми вимірювання та накопичення експериментальних даних системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами автотранспорту

### 3.2. Архітектура програмної системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту

Ідентифікація та навчання інтервальних математичних моделей реалізовано в модулі прогнозування забруднення, який побудований на основі MVC патерну.

На рисунку 3.8 представлено діаграму варіантів використання системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту. В системі виділено наступних акторів – користувач, оператор мобільної станції та адміністратор.

Оператор мобільної станції здійснює управління місією, вибір відображення даних, експорт даних на сервер, перегляд та регулювання процесом польоту квадрокоптера.

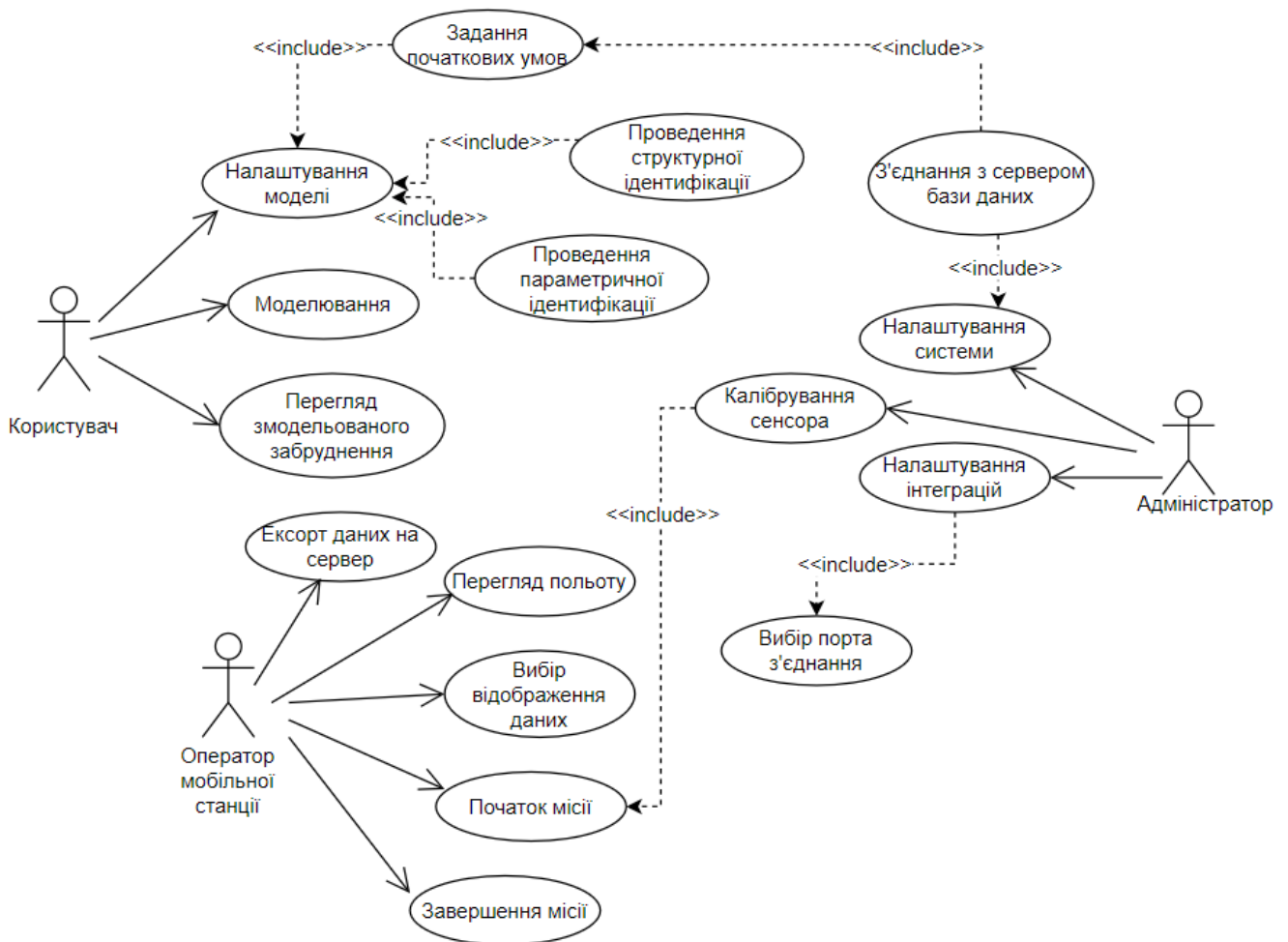


Рис. 3.8. Діаграма варіантів використання системи

Користувач системи може здійснювати управління процесом моделювання, включаючи процеси налаштування моделі та перегляд результатів математичного моделювання[126-129].

На рисунку 3.9 представлено діаграму послідовностей для користувача системи, яка детально описує програмну реалізацію дій користувача при роботі з системою.

Дана діаграма також показує, як взаємодіє користувач системи з основними програмними компонентами, включаючи засоби взаємодії з серверною частиною системи, враховуючи методи обміну інформацією з базою даних та відповідне опрацювання результатів математичного моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

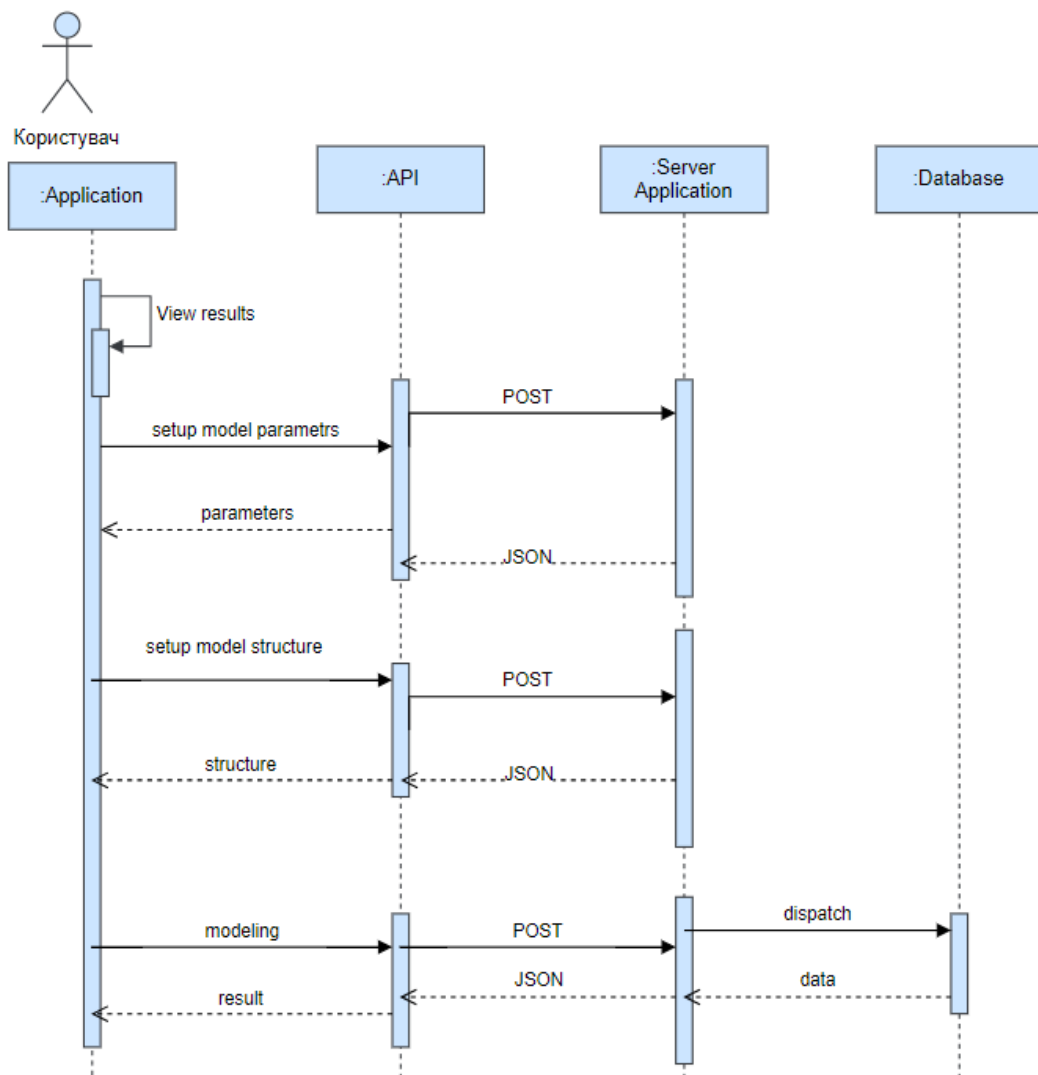


Рис. 3.9. Діаграма послідовностей для користувача системи

На рисунку 3.10 представлено діаграму послідовностей для адміністратора системи, яка детально описує програмну реалізацію дій адміністратора при роботі із системою для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

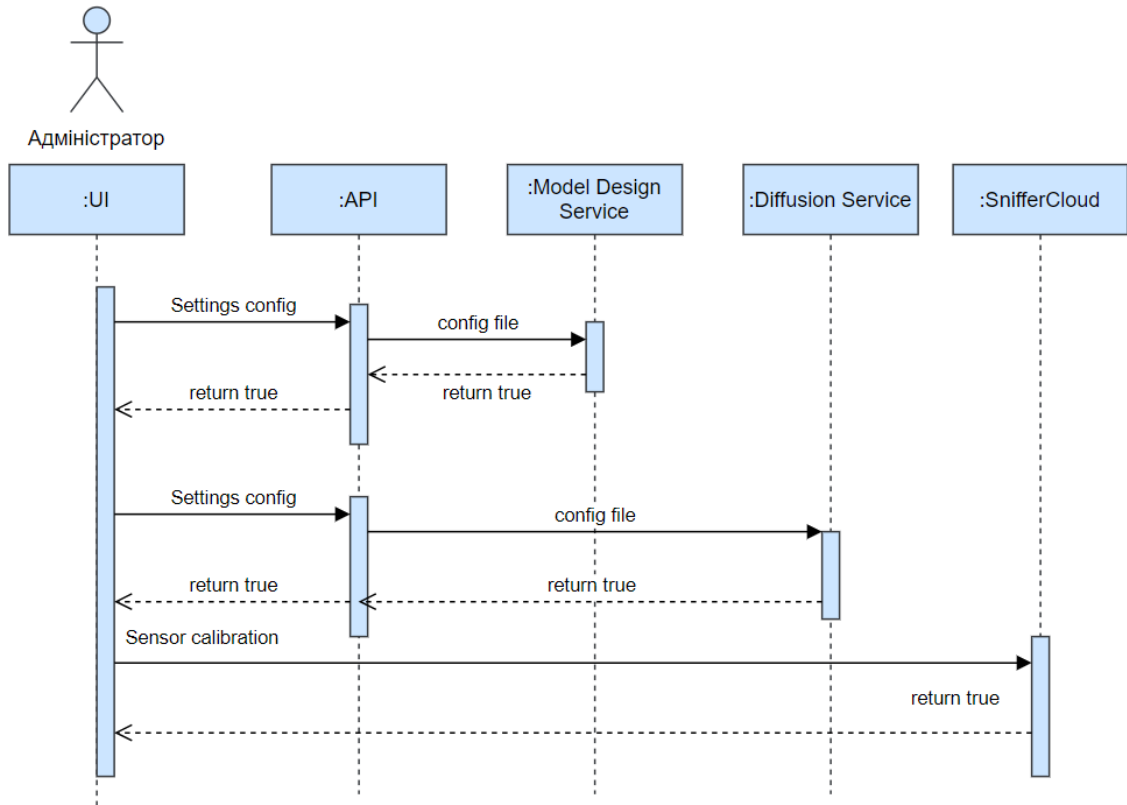


Рис. 3.10. Діаграма послідовностей для адміністратора системи

На рисунку 3.11 представлено діаграму активностей, яка описує динамічні аспекти поведінки системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту у вигляді блок-схеми, яка відображає основні бізнес-процеси, логіку основних процедур та основні потоки робіт — переходи від однієї активності до іншої.

Діаграма активності в контексті математичного моделювання може використовуватися для візуалізації послідовності активностей, які здійснюються під час процесу математичного моделювання. Вона допомагає розуміти, які кроки потрібно виконувати для створення, перевірки та застосування математичної моделі.

Діаграма активності дозволяє візуалізувати послідовність дій та зв'язки між ними під час математичного моделювання. Вона допомагає уточнити процес моделювання, виявити можливі помилки та покращити ефективність роботи з моделлю.

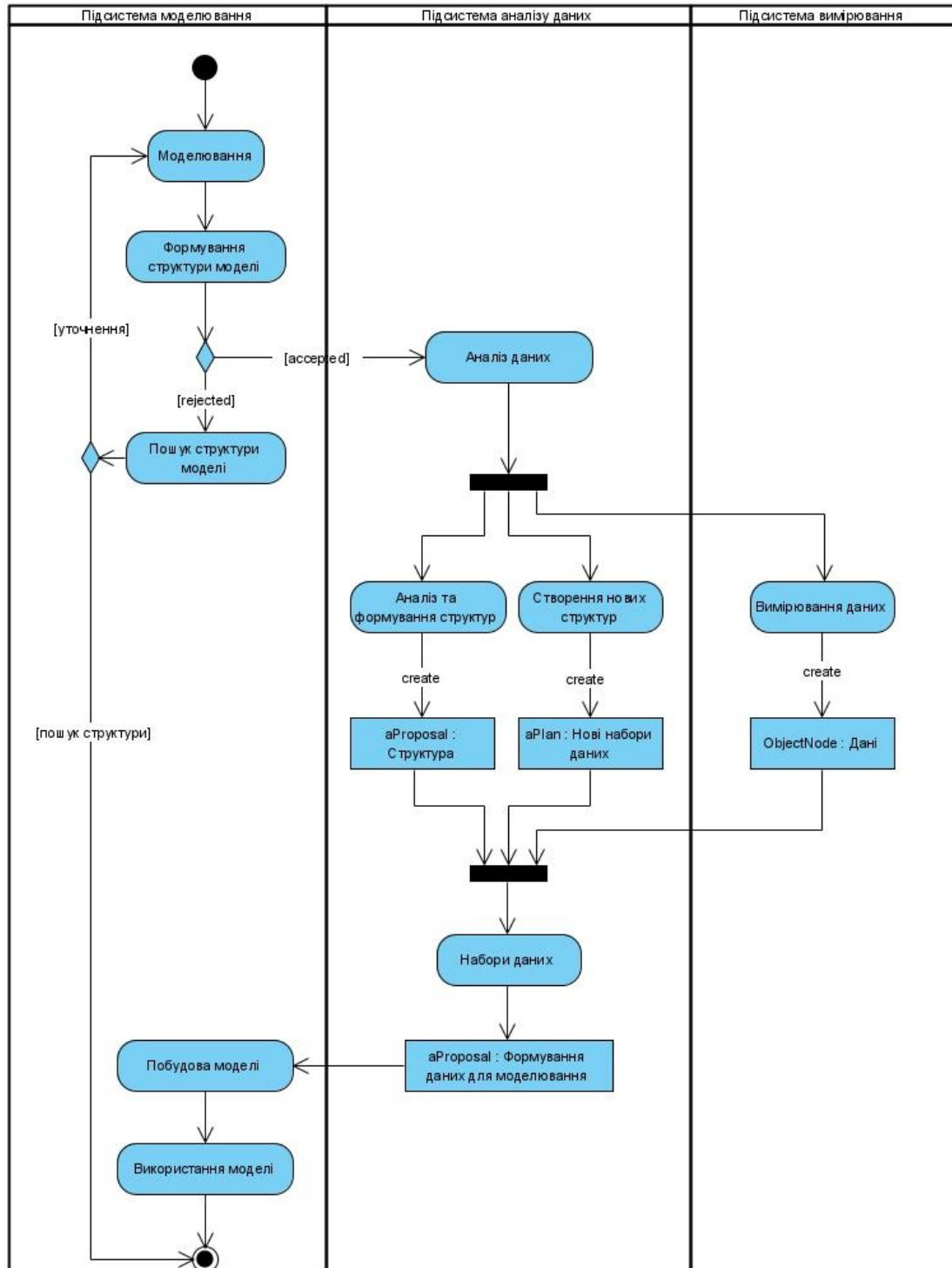


Рис. 3.11. Діаграма активностей системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автортранспортів

На рисунку 3.12 представлено діаграму комунікації користувача із системою для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

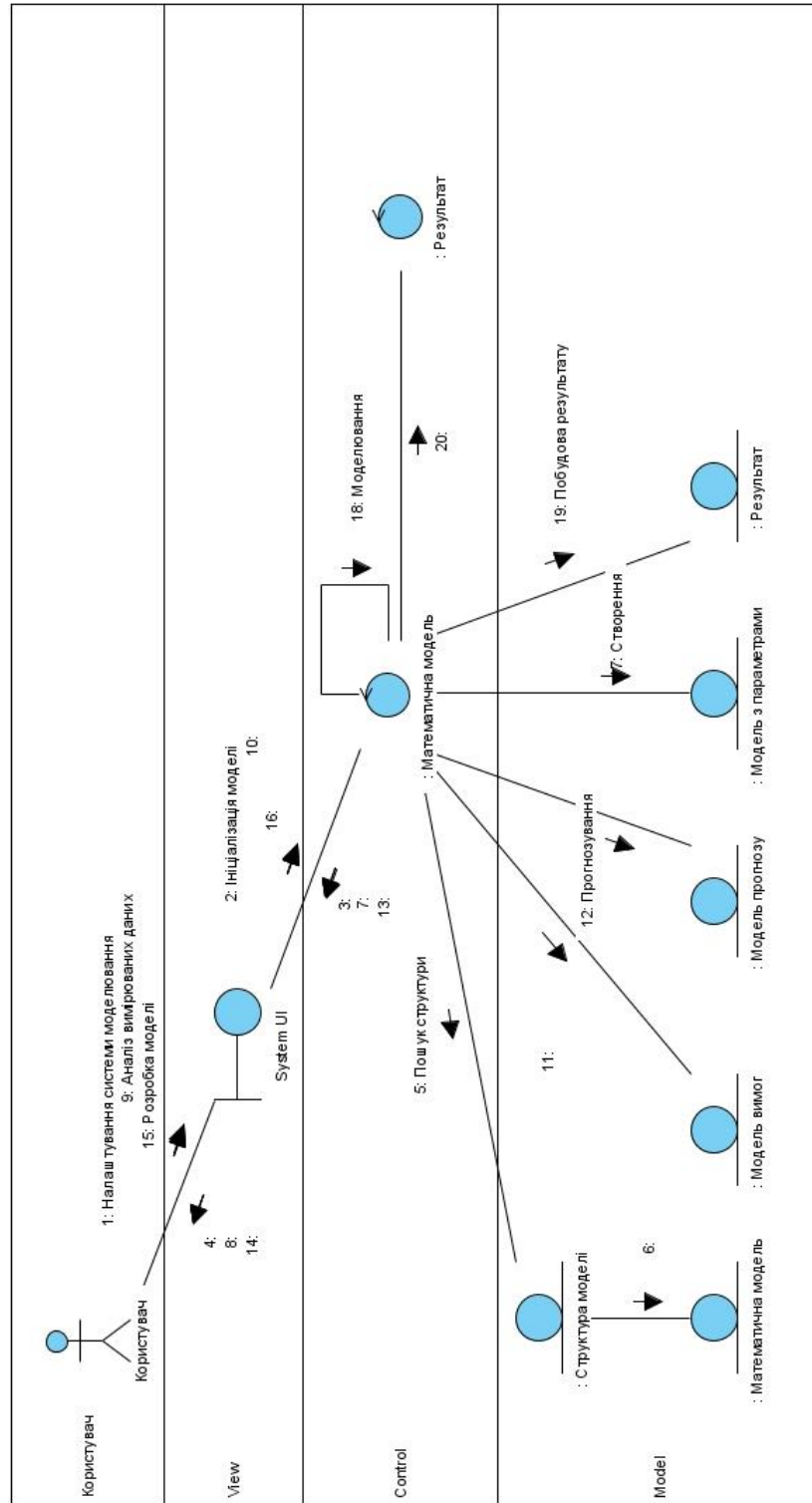


Рис. 3.12. Діаграма комунікації користувача із системою математичного моделювання



Діаграма комунікації користувача із системою математичного моделювання дозволяє візуалізувати послідовність дій та взаємодію між користувачем і системою. Вона допомагає зрозуміти, які дані передаються, які операції виконуються і які результати отримуються під час процесу математичного моделювання.

Діаграма кінцевого автомата (рисунок 3.13) для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту може включати такі стани та переходи:

Стан "Початок": початковий стан моделі, в якому система чекає на вхідні дані.

Стан "Очікування даних": система очікує отримання даних про викиди автотранспорту.

Стан "Аналіз даних": система аналізує отримані дані та визначає рівень забруднення ґрунтів.

Стан "Перевищений ліміт": якщо рівень забруднення перевищує встановлений ліміт, система переходить в цей стан.

Стан "Допустимий рівень": якщо рівень забруднення залишається в межах допустимого ліміту, система перебуває в цьому стані.

Стан "Попередження": система переходить в цей стан, якщо рівень забруднення наближається до допустимого ліміту.

Стан "Зупинка": кінцевий стан моделі, в якому система припиняє роботу.

Переходи між станами можуть мати такі умови:

З "Початок" до "Очікування даних": початковий вхід або запуск системи.

З "Очікування даних" до "Аналіз даних": отримання та обробка даних про викиди автотранспорту.

З "Аналіз даних" до "Перевищений ліміт": якщо рівень забруднення перевищує встановлений ліміт.

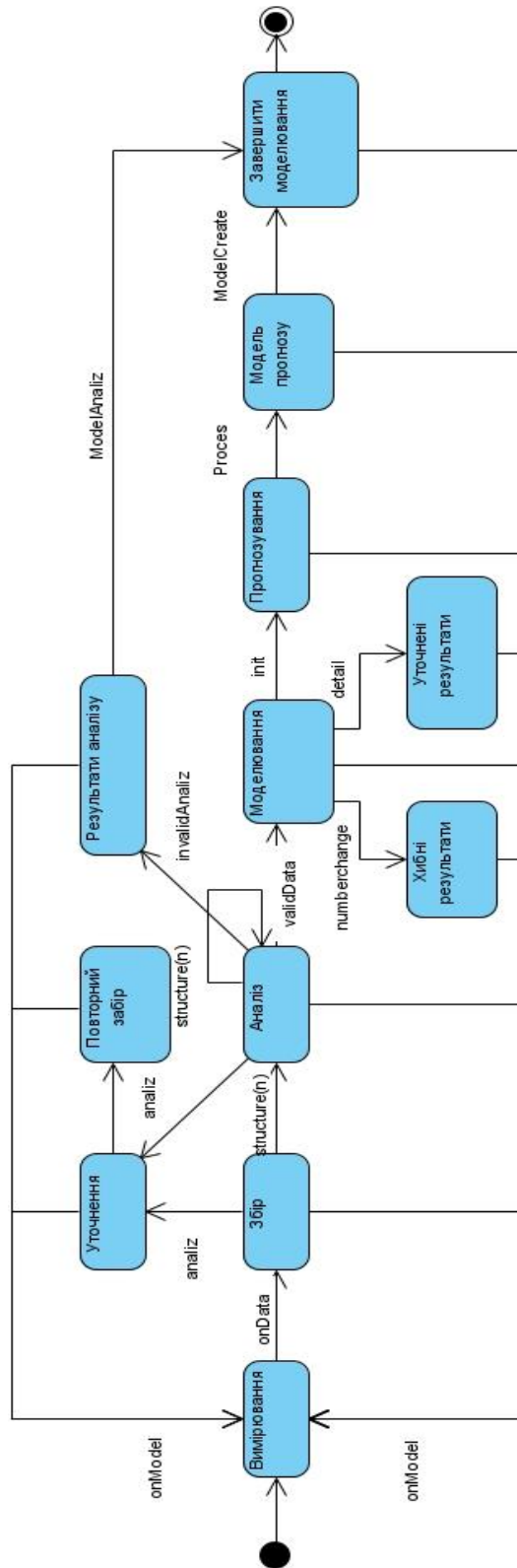


Рис. 3.13. Діаграма комунікації користувача із системою математичного моделювання

З "Аналіз даних" до "Допустимий рівень": якщо рівень забруднення залишається в межах допустимого ліміту.

З "Аналіз даних" до "Попередження": якщо рівень забруднення наближається до допустимого.

На рисунку 3.14 зображено загальну діаграму класів, яка відповідає за логіку навчання моделей на основі отриманих даних вимірювань забруднення ґрунтів шкідливими викидами.

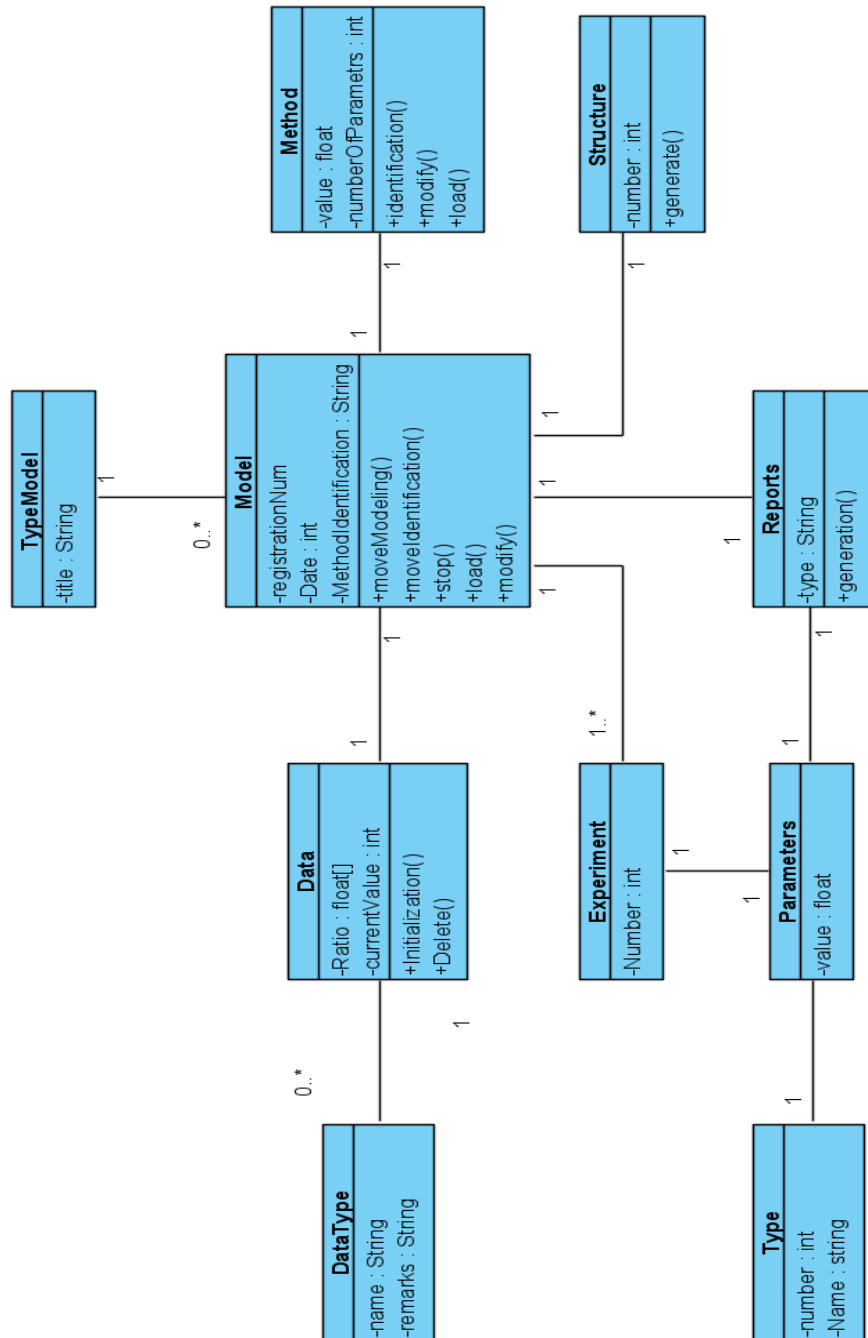


Рис. 3.14. Діаграма класів модуля обробки даних для ідентифікації та навчання моделей

Ядром системи моніторингу є підсистема моделювання та відображення результатів. Даний модуль побудований на основі патерну MVC, який дозволяє створювати кілька представлень для моделі класів системи для математичного моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

Крім того, у цьому підході дублювання коду дуже обмежене, оскільки воно відокремлює дані та бізнес-логіку від відображення що є хорошою перевагою при проектуванні та розробці прикладного програмного забезпечення для математичного моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту[130-133].

Рівень моделі класів у модулі прогнозування забруднення представлено сервісом дизайну математичної моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці та компонентом розрахунку дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі[133,134].

На рисунку 3.15 представлено схему побудови моделі, яка починається з побудови інтервального різницевого оператора, який, в свою чергу, взаємодіє з інтелектувальним модулем для формування структури моделі та сховищем формул і умов початкового моделювання.

Після того, як отримано ІРО дані переходять до набору модулів, які відповідають за побудову структури інтервального різницевого оператора. В основу взаємодії модулів на цьому етапі закладено поведінкову модель бджолиної колонії. Цей метод дозволяє знизити складність обчислень при виконанні структурної ідентифікації складних об'єктів, які представлені у вигляді інтервальних дискретних моделей. Для початку потрібно сформулювати початкову кількість множин структурних елементів, після чого визначаємо їхню якість. Далі формуються схожі структури та проводиться попарна селекція на основі якості початкової множини структур. Для проведення групової селекції потрібно згенерувати новий набір множин, після чого перевіряється лічильник вичерпності структур. Якщо ж для поточних структур знайдеться хоча б одна, для якої немає заміни, то звершується процедура структурної ідентифікації інтервальної моделі та

проводиться параметрична ідентифікація, яка є останнім етапом дизайну математичної моделі.

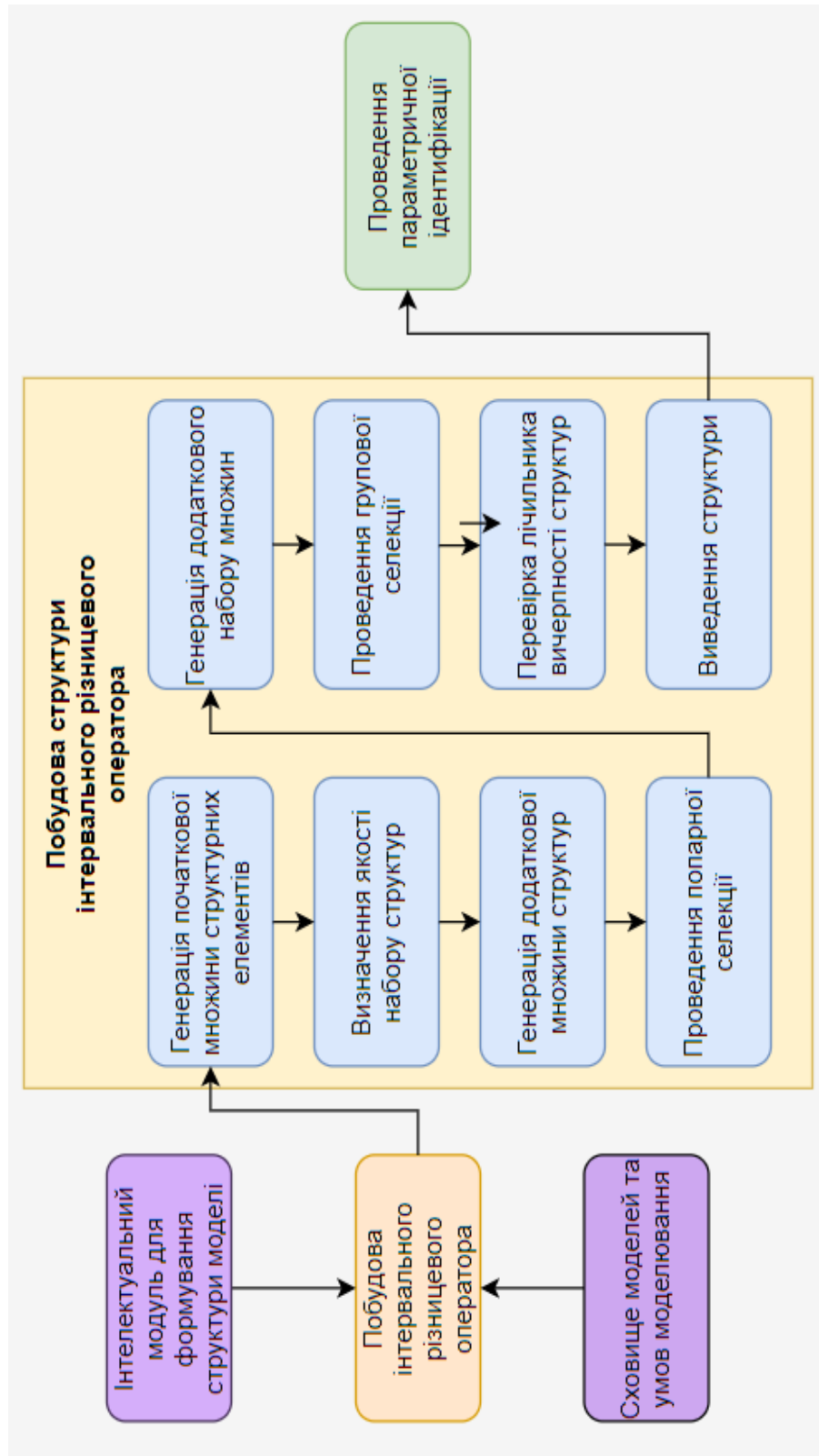


Рис. 3.15. Загальна схема побудови моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці

Щодо компоненти, яка розраховує дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі, то робота починається на етапі обчислення різницевих апроксимацій, на основі яких працюють модулі обчислення дифузії у воді і повітрі. Результати роботи цих модулів є базою для побудови концентрації азотної кислоти в ґрунті та ґрунтових водах.

На рисунку 3.16 представлено модульну структуру підсистеми розрахунку дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі.

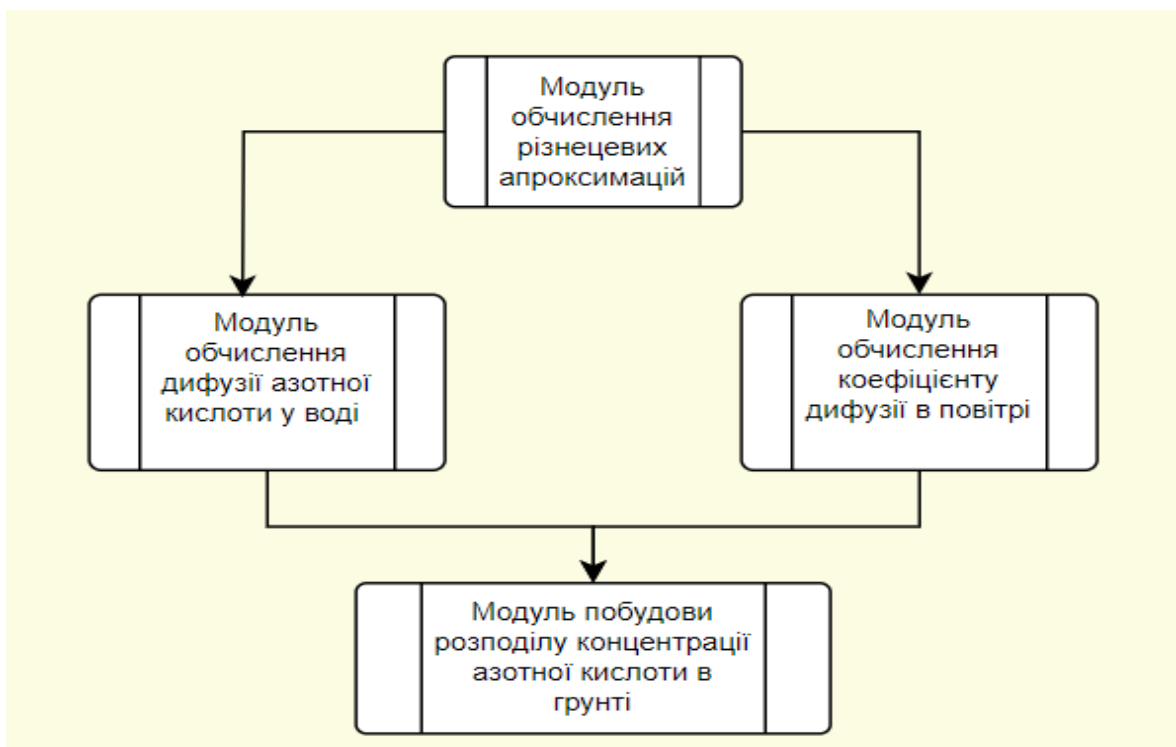


Рис. 3.16. Компонента розрахунку дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі

Рівень об'єктно-орієнтованої моделі представлений набором класів, які забезпечують виконання основної бізнес-логіки системи та вміщує опис внутрішньої структури та типи взаємозв'язків між окремими об'єктами та підсистемами, що сприяє розвитку концептуальної моделі системи. Клас DAO (Data Access Object) відповідає за доступ до даних та сховищ моделей. Реалізовані методи в цьому класі описують CRUD операції, що забезпечує відокремлення доступу до даних від основної бізнес-логіки, що дозволяє забезпечити чистоту

архітектури та підтримувати принципи модульності і повторного використання коду.

Методи класів IRO, PairSelecton, GroupSelection, ModelParametrIdentification базуються на математичному забезпеченні, яке описано вище. На рисунку 3.17. зображено загальну діаграму класів системи моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

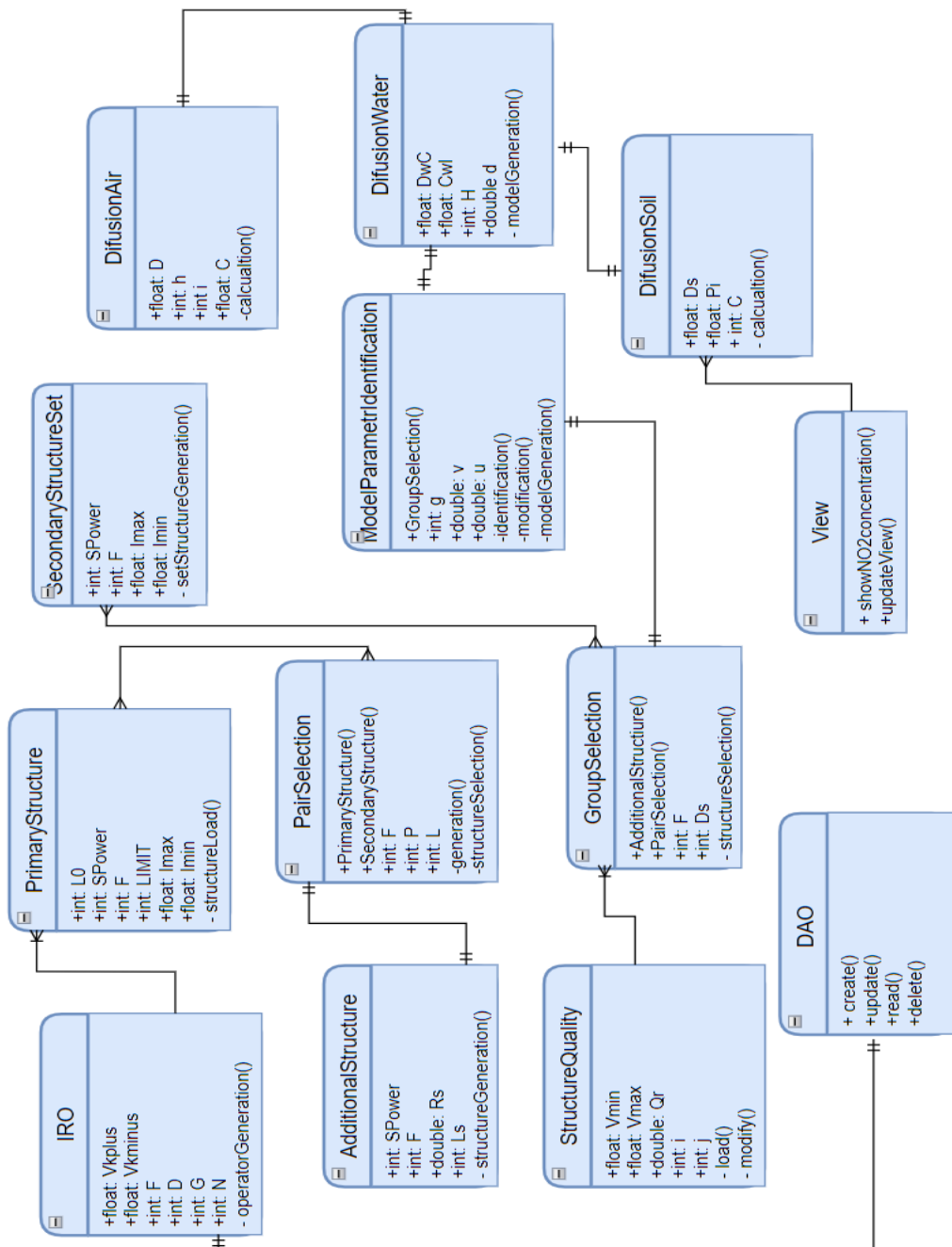


Рис. 3.17. Діаграма класів системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту

Слід зазначити, що всі атрибути класі є `public` оскільки використовуються в методах інших класів. Більшість методів навпаки є `privat`, що забороняє їх виклик та використання в межах іншого класу. Класи, в яких генеруються структури, множини структур та визначається їх якість, є допоміжними та дозволяють виокремити загальні операції і функціональність, які можуть використовуватися в інших місцях програми. Це дозволяє уникнути повторюваності коду і забезпечити більш підтримуваний код у випадку зміни математичних формул чи інтеграції зовнішніх сервісів.

З урахуванням побудованої моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці, класи, в яких релізовано процедуру обчислення дифузії цієї шкідливої речовини в ґрунті, водоймі та повітрі, спираються на відповідні математичні моделі, які описують цей процес. Після чого результати обчислень використовуються методами класу `View`, який забезпечує візуальне відображення концентрацій діоксиду азоту в ґрунтах та ґрунтових водах. Лістинг коду основних модулів наведено в додатку Б.

### **3.3. Проектування та реалізація підсистеми аналізу та зберігання інформації**

Важливим етапом реалізації програмної системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту є проектування та реалізація підсистеми аналізу та зберігання інформації. Для програмної реалізації було обрано СУБД `MSSQL`. `MSSQL` надає високу продуктивність завдяки своїм оптимізованим алгоритмам обробки запитів, планувальникам і кешуванню. Він може ефективно обробляти великі обсяги даних та високонавантажені операції[135-140].

Інтеграція з іншими продуктами `Microsoft`: `MSSQL` гармонійно інтегрується з іншими продуктами `Microsoft`, такими як `Microsoft Azure`, `Microsoft .NET Framework`, `Visual Studio` і `Microsoft Power BI`. Це спрощує розробку, розгортання та аналіз даних в екосистемі `Microsoft`. `MSSQL` відомий своєю надійністю і



стабільністю. Він має вбудовані механізми відновлення, резервного копіювання та відміни операцій, що дозволяє запобігти втраті даних або пошкодженню бази даних[141-146].

На рисунку 3.18 представлено узагальнену ER діаграму бази даних, яка використовується в процесі моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

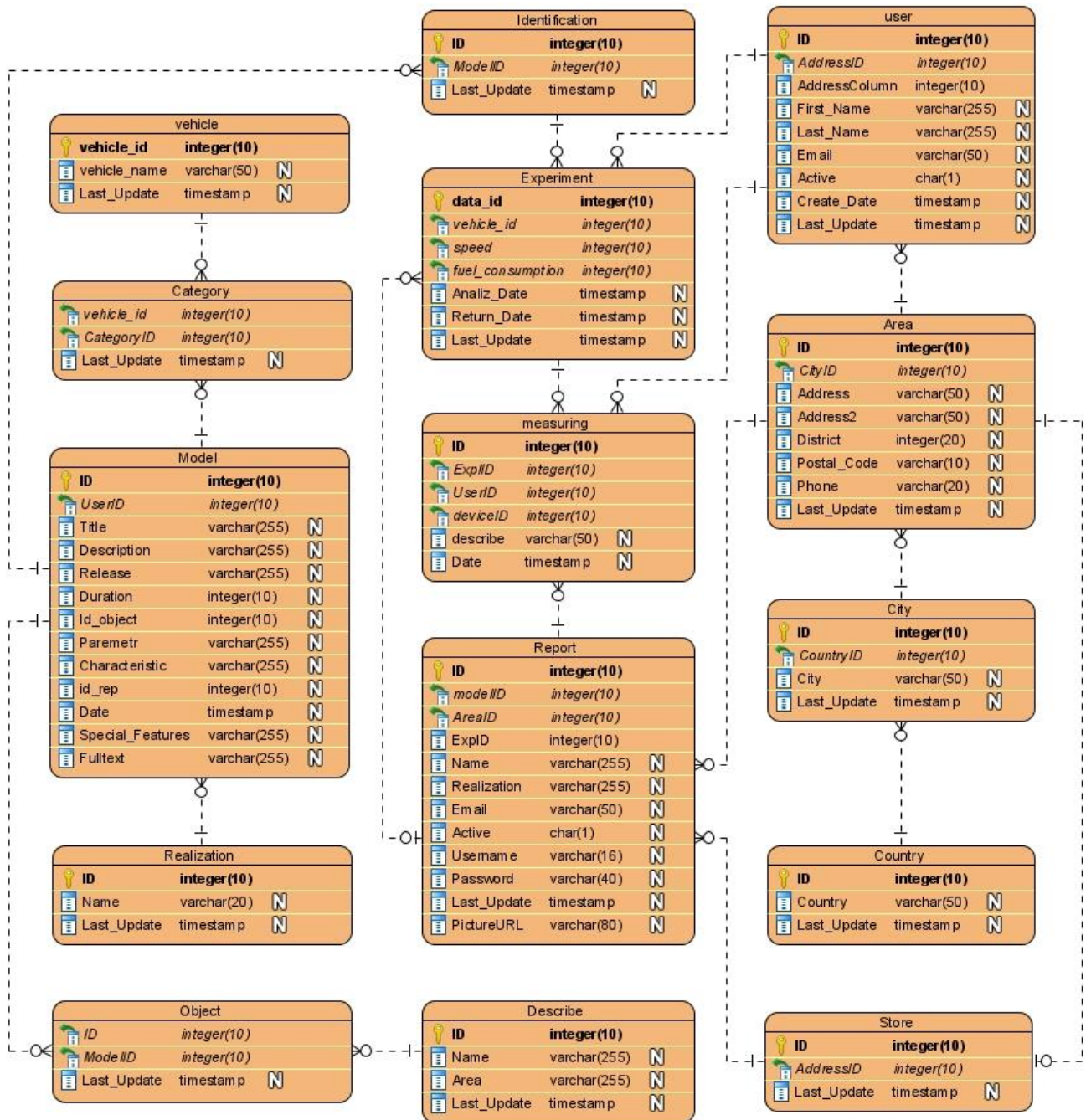


Рис. 3.18. ER-діаграма бази даних системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту

Для реалізації основного функціоналу програмної системи реалізовано ключові та додаткові відношення. Розглянемо детальніше спроектовану структуру бази даних. Атрибути в таблицях відображають базові характеристики виділених сутностей, а відповідні типи даних та їх розмірність була сформована на основі їх фізичної інтерпретації.

Структура відношення “model” зображена на рисунку 3.19 і відображає інформацію про опис моделі, вхідні та вихідні параметри моделі, опис об’єкта моделювання, опис предметної області та інші атрибути, які необхідні в процесі збереження інформації про побудовану модель.














Model		
 ID	integer(10)	
 UserID	integer(10)	
 Title	varchar(255)	N
 Description	varchar(255)	N
 Release	varchar(255)	N
 Duration	integer(10)	N
 Id_object	integer(10)	N
 Parametr	varchar(255)	N
 Characteristic	varchar(255)	N
 id_rep	integer(10)	N
 Date	timestamp	N
 Special_Features	varchar(255)	N
 Fulltext	varchar(255)	N

Рис. 3.19. Структура відношення «model»

Важливим елементом розуміння структури підсистеми аналізу та зберігання інформації є наявність відповідних зв’язків між сутностями предметної області та їх відображення в описах конкретної СУБД. Для цього в роботі використано DDL. DDL (Data Definition Language) описує метадані бази даних і використовується для визначення, створення, зміни та видалення структурних об’єктів бази даних.

DDL представлення для відношення «model»:

```
CREATE TABLE Model (
  ID int IDENTITY NOT NULL,
  UserID int NOT NULL,
```

Title varchar(255) NULL,  
 Description varchar(255) NULL,  
 Release varchar(255) NULL,  
 Duration int NULL, Id\_object int NULL,  
 Paremetr varchar(255) NULL,  
 Characteristic varchar(255) NULL,  
 id\_rep int NULL,  
 [Date] datetime NULL,  
 Special\_Features varchar(255) NULL,  
 [Fulltext] varchar(255) NULL, PRIMARY KEY (ID));

Таблиця "vehicle" (рисунок 3.20):

- vehicle\_id (ідентифікатор транспортного засобу);
- vehicle\_name (назва транспортного засобу);
- vehicle\_type (тип транспортного засобу, наприклад, легковий автомобіль, вантажівка тощо).

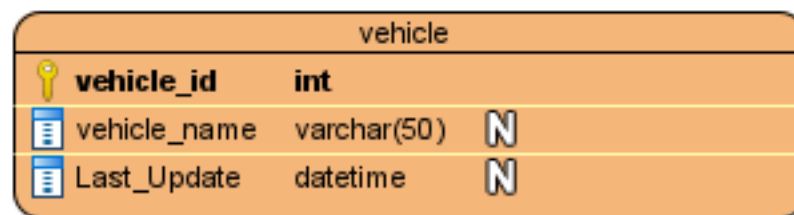


Рис. 3.20. Структура відношення «vehicle»

DDL представлення відношення «vehicle»:

```
CREATE TABLE vehicle (
  vehicle_id int IDENTITY NOT NULL,
  vehicle_name varchar(50) NULL,
  Last_Update datetime NULL,
  PRIMARY KEY (vehicle_id));
```

Таблиця "Category" (рисунок 3.21) використовується для зберігання

інформації про категорії транспортних засобів:

- vehicle\_id (ідентифікатор транспортного засобу);
- CategoryID (ідентифікатор категорії транспортного засобу);
- Last\_Update (дата оновлення відповідної категорії).

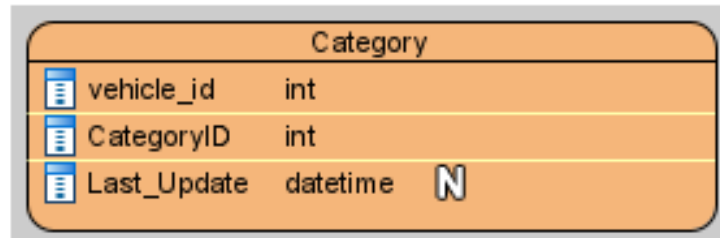


Рис. 3.21. Структура відношення «Category»

DDL представлення відношення «Category»:

```
CREATE TABLE Category (
  vehicle_id int NOT NULL,
  CategoryID int NOT NULL,
  Last_Update datetime NULL);
```

Відношення «Realization» (рисунок 3.22) використовується для зберігання інформації про реалізацію математичних моделей:

- #ID : int – ідентифікатор реалізації;
- Name : varchar(20) – опис реалізації;
- Last\_Update : datetime – дата та час реалізації.

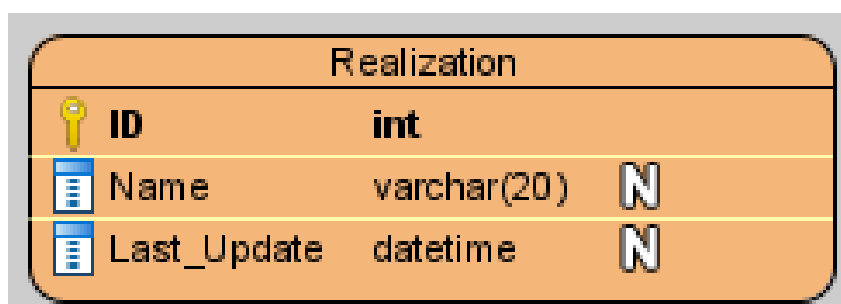


Рис. 3.22. Структура відношення «Realization»

DDL представлення відношення «Realization»:

```
CREATE TABLE Realization (
  ID int IDENTITY NOT NULL,
  Name varchar(20) NULL, Last_Update datetime NULL,
  PRIMARY KEY (ID));
```

Відношення «Object» - використовується для збереження інформації про об'єкт моделювання і має наступну структуру (рисунок 3.23):

#ID : int – ідентифікатор об'єкта моделювання;

#ModelID : int – ідентифікатор математичної моделі;

Last\_Update : datetime – дата та час оновлення інформації.

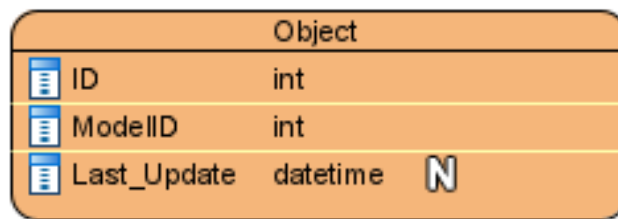


Рис. 3.23. Структура відношення «Object»

DDL представлення відношення «Object»:

```
CREATE TABLE Object (
  ID int NOT NULL,
  ModelID int NOT NULL,
  Last_Update datetime NULL);
```

Відношення «Identification» (рисунок 3.24) містить інформацію, яка стосується процедури ідентифікації математичної моделі та містить таку структуру:

+ID : int – ідентифікатор процесу ідентифікації;

#ModelID : int – ідентифікатор математичної моделі;

Last\_Update : datetime - – дата та час оновлення інформації.

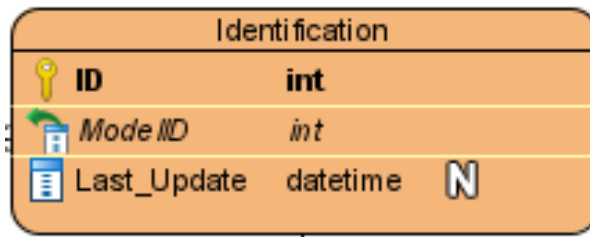


Рис. 3.24. Структура відношення «Identification»

DDL представлення відношення «Identification»:

```
CREATE TABLE Identification (
  ID int IDENTITY NOT NULL,
  ModelID int NOT NULL,
  Last_Update datetime NULL,
  PRIMARY KEY (ID));
```

Відношення «Experiment» використовується для зберігання інформації про параметри та перебіг експериментальних досліджень та містить таку структуру (рисунок 3.25):

+data\_id : int – ідентифікатор експерименту;  
 #vehicle\_id : int – ідентифікатор транспортних потоків;  
 #speed : int – швидкість транспорту;  
 #fuel\_consumption : int – тип двигуна та палива;  
 Analiz\_Date : datetime – дата проведення експерименту;  
 Return\_Date : datetime – дата останнього оновлення даних;  
 Last\_Update : datetime – дата модифікації запису.

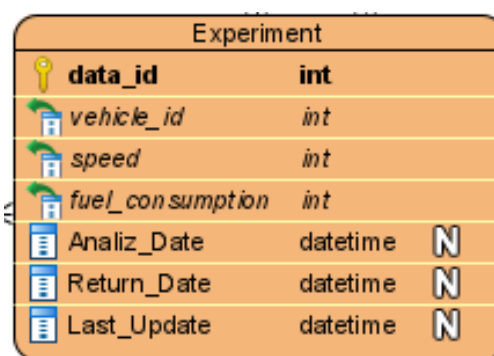


Рис. 3.25. Структура відношення «Experiment»

DDL представлення відношення «Experiment»:

```
CREATE TABLE Experiment (
  data_id int IDENTITY NOT NULL,
  vehicle_id int NOT NULL,
  speed int NOT NULL,
  fuel_consumption int NOT NULL,
  Analiz_Date datetime NULL,
  Return_Date datetime NULL,
  Last_Update datetime NULL,
  PRIMARY KEY (data_id));
```

Відношення «measuring» використовується для зберігання інформації про процес та процедуру здійснення вимірювань (рисунок 3.26) та має наступну структуру:

+ID : int – ідентифікатор вимірюваних даних;  
 #ExpID : int – ідентифікатор проведеного експерименту;  
 #UserID : int – ідентифікатор користувача;  
 #deviceID : int – ідентифікатор обладнання;  
 describe : varchar(50) – опис процедури вимірювання;  
 Date : datetime – дата проведення експерименту.

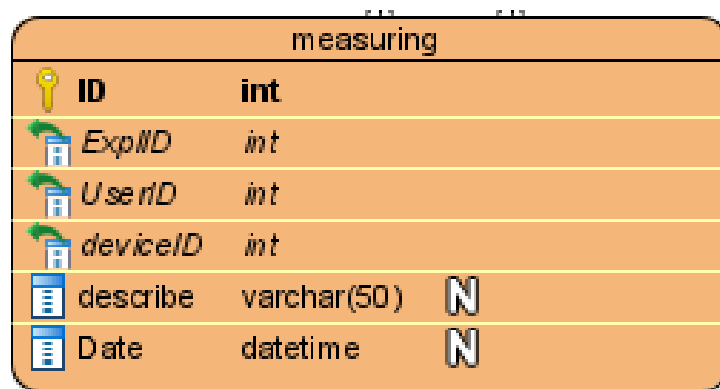


Рис. 3.26. Структура відношення «measuring»

DDL представлення відношення «measuring»:

```
CREATE TABLE measuring (
```

```

ID int IDENTITY NOT NULL,
ExplID int NOT NULL,
UserID int NOT NULL,
deviceID int NOT NULL,
describe varchar(50) NULL,
[Date] datetime NULL, PRIMARY KEY (ID));

```

Відношення «Report» (рисунок 3.27) використовується для зберігання інформації про структуру та тип сформованих у системі звітів та має таку структуру:

```

+ID : int – ідентифікатор запису;
#modelID : int – ідентифікатор математичної моделі;
#AreaID : int – ідентифікатор предметної області;
ExpID : int – ідентифікатор експерименту;
Name : varchar(255) – назва звіту;
Realization : varchar(255) – опис реалізації звіту;
Email : varchar(50) – email прив'язки звіту;
Active : char(1) – відмітка статусу звіту;
Username : varchar(16) – користувач, який сформував структуру звіту;
Password : varchar(40) – пароль на звіт при необхідності;
Last_Update : datetime – дата формування звіту;
PictureURL : varchar(80) – приклад із скрінном, що відображає результат
формування звіту.

```

DDL представлення відношення «Report»:

```

CREATE TABLE Report (
ID int IDENTITY NOT NULL,
modelID int NOT NULL,
AreaID int NOT NULL,
ExpID int NOT NULL,
Name varchar(255) NULL,
Realization varchar(255) NULL,
Email varchar(50) NULL,

```



Active char(1) NULL,  
 Username varchar(16) NULL,  
 Password varchar(40) NULL,  
 Last\_Update datetime NULL,  
 PictureURL varchar(80) NULL, PRIMARY KEY (ID));

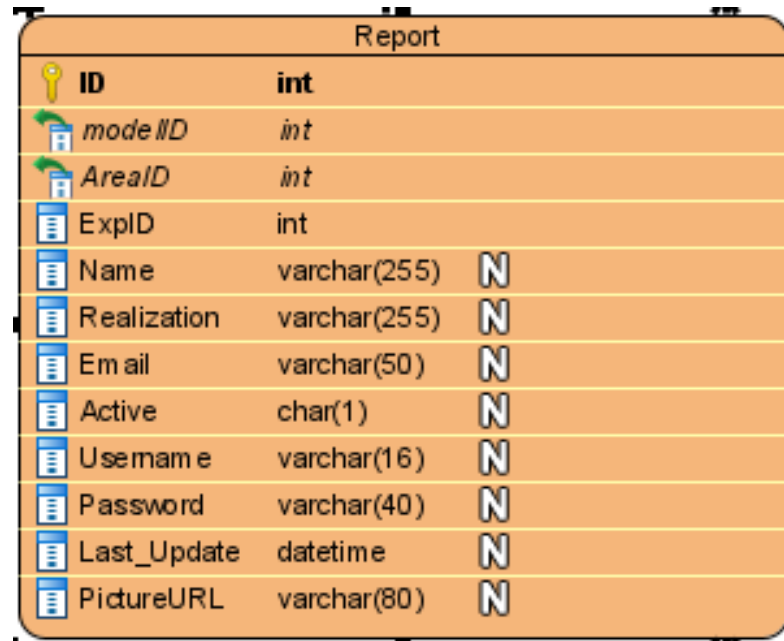


Рис. 3.27. Структура відношення «Report»

Відношення «Describe» (рисунок 3.28) використовується в якості довідника і містить інформацію про основні характеристики досліджуваної предметної області та має наступну структуру:

+ID : int – ідентифікатор запису;  
 Name : varchar(255) – найменування поля в довіднику;  
 Area : varchar(255) – предметна область;  
 Last\_Update : datetime – дата модифікації запису.

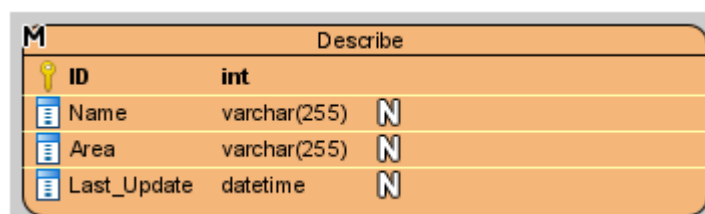


Рис. 3.28. Структура відношення «Describe»

DDL представлення відношення «Describe»:

```
CREATE TABLE Describe (
  ID int IDENTITY NOT NULL,
  Name varchar(255) NULL,
  Area varchar(255) NULL,
  Last_Update datetime NULL,
  PRIMARY KEY (ID));
```

Відношення «user» (рисунок 3.29) використовується для збереження інформації про користувачів системи та містить наступну структуру:

+ID : int – ідентифікатор запису;

#AddressID : int – ідентифікатор адреси;

AddressColumn : int – поле з адресою;

First\_Name : varchar(255) – ім'я користувача;

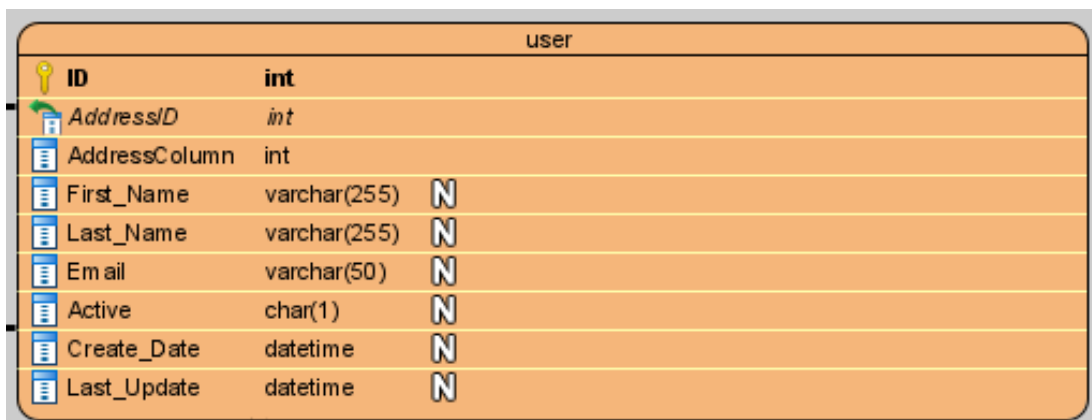
Last\_Name : varchar(255) – прізвище користувача;

Email : varchar(50) – email користувача;

Active : char(1) – поле з вітміткою про статус користувача;

Create\_Date : datetime – дата створення запису з інформацією про користувача системи;

Last\_Update : datetime дата модифікації запису з інформацією про користувача системи.












user		
 ID	int	
 AddressID	int	
 AddressColumn	int	
 First_Name	varchar(255)	N
 Last_Name	varchar(255)	N
 Email	varchar(50)	N
 Active	char(1)	N
 Create_Date	datetime	N
 Last_Update	datetime	N

Рис. 3.29. Структура відношення «user»

DDL представлення відношення «user»:

```
CREATE TABLE [user] (
  ID int IDENTITY NOT NULL,
  AddressID int NOT NULL,
  AddressColumn int NOT NULL,
  First_Name varchar(255) NULL,
  Last_Name varchar(255) NULL,
  Email varchar(50) NULL,
  Active char(1) NULL,
  Create_Date datetime NULL,
  Last_Update datetime NULL,
  PRIMARY KEY (ID));
```

Відношення «Area» (рисунок 3.30) використовується для збереження інформації про предметну область, яка використовується як для здійснення вимірювань, так і для моделювання та містить таку структуру:

+ID : int – ідентифікатор запису;  
 #CityID : int – ідентифікатор міста;  
 Address : varchar(50) – адреса розміщення;  
 Address2 : varchar(50) – адреса здійснення вимірювань;  
 District : int – район розташування;  
 Postal\_Code : varchar(10) – поштовий код;  
 Phone : varchar(20) – телефон для контакту;  
 Last\_Update : datetime – дата оновлення запису.









Area		
 ID	int	
 CityID	int	
 Address	varchar(50)	N
 Address2	varchar(50)	N
 District	int	N
 Postal_Code	varchar(10)	N
 Phone	varchar(20)	N
 Last_Update	datetime	N

Рис. 3.30. Структура відношення «Area»

DDL представлення відношення «Area»:

```
CREATE TABLE Area (
  ID int IDENTITY NOT NULL,
  CityID int NOT NULL,
  Address varchar(50) NULL,
  Address2 varchar(50) NULL,
  District int NULL,
  Postal_Code varchar(10) NULL,
  Phone varchar(20) NULL,
  Last_Update datetime NULL, PRIMARY KEY (ID));
```

Відношення «City» (рисунок 3.31) містить інформацію про місто, яке досліджується та має наступну структуру:

+ID : int – ідентифікатор запису;

#CountryID : int – ідентифікатор країни розташування;

City : varchar(50) – назва міста;

Last\_Update : datetime – дана оновлення запису.

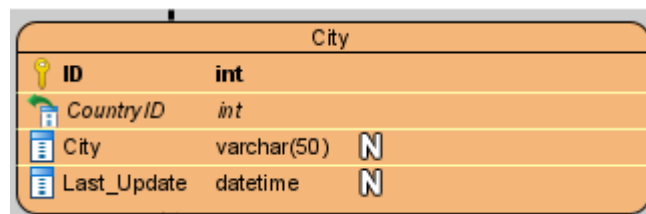


Рис. 3.31. Структура відношення «City»

DDL представлення відношення «City»:

```
CREATE TABLE City (
  ID int IDENTITY NOT NULL,
  CountryID int NOT NULL,
  City varchar(50) NULL,
  Last_Update datetime NULL,
  PRIMARY KEY (ID));
Last_Update datetime NULL, PRIMARY KEY (ID));
```

Інші відношення в системі використовуються для забезпечення цілісності та повноти системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту. В додатку А наведено опис DDL відношень підсистеми аналізу та зберігання інформації для математичного моделювання.

### 3.4 Особливості розгортання та налаштування системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту

На рисунку 3.32 представлено загальну структуру компонентів системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту та особливості взаємодії між цими компонентами.

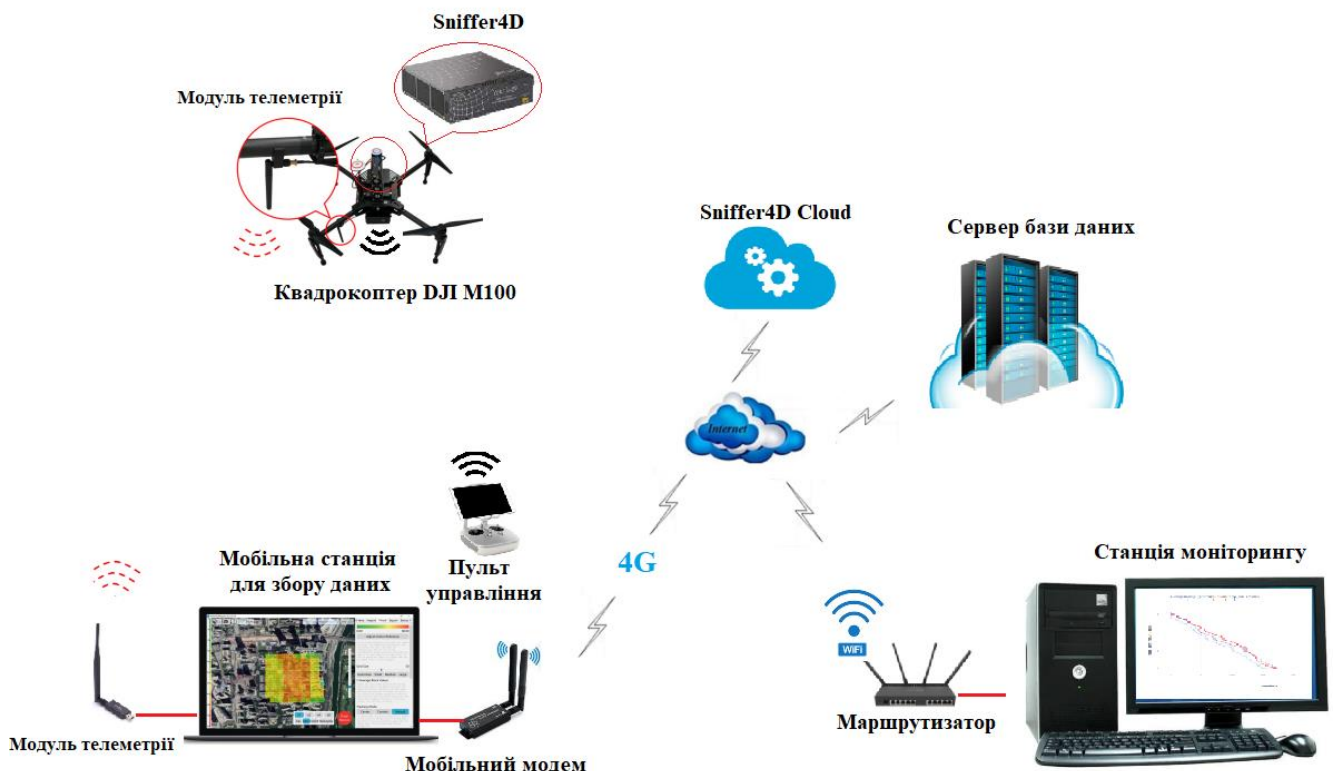


Рис. 3.32. Загальна структура компонентів системи моніторингу

Основними компонентами системи моніторингу є Sniffer4D, мобільна станція

для збору даних та сервер бази даних.

Sniffer4D взаємодіє з сервером для збору даних, які стосуються забруднення ґрунтів. Це може включати отримання даних про викиди автотранспорту, які записуються в базу даних.

Sniffer4D може виконувати запити до бази даних для отримання інформації про забруднення ґрунтів, таку як рівень забруднення, місце виникнення забруднення, тип викиду тощо. Ці запити можуть бути виконані за допомогою мови запитів, такої як SQL.

Оновлення бази даних: Sniffer4D може взаємодіяти з базою даних для оновлення і збереження нових даних про забруднення ґрунтів. Це може включати внесення нових записів про викиди, зміну рівня забруднення або додавання нових місць забруднення.

Sniffer4D може використовувати дані з бази даних для проведення аналізу і моделювання забруднення ґрунтів. Він може використовувати статистичні методи, математичні моделі та інші алгоритми для прогнозування та визначення впливу викидів на середовище.

Візуалізація результатів в Sniffer4D може взаємодіяти з сервером і базою даних для отримання результатів моделювання та відображення їх у вигляді графіків, діаграм або інших візуальних представлень. Це допомагає користувачам аналізувати дані про забруднення ґрунтів.

Загалом, взаємодія Sniffer4D з сервером і базою даних є важливим аспектом моделювання забруднення ґрунтів, який дозволяє збирати, зберігати, аналізувати та візуалізувати дані для ефективного управління забрудненням ґрунтів.

Виходячи із загальної структури системи моніторингу, на рисунку 3.33 представлено діаграму, яка описує особливості розгортання системи з врахуванням основних програмних компонентів та способів взаємодії з ними.

Модуль моделювання: це програмний модуль, який здійснює моделювання забруднення ґрунтів на основі отриманих даних. Він вміщує математичні моделі, алгоритми обробки даних, аналітичні інструменти тощо. Модуль моделювання працює в середині серверної інфраструктури і отримує дані з бази даних для

обробки та генерації результатів моделювання.

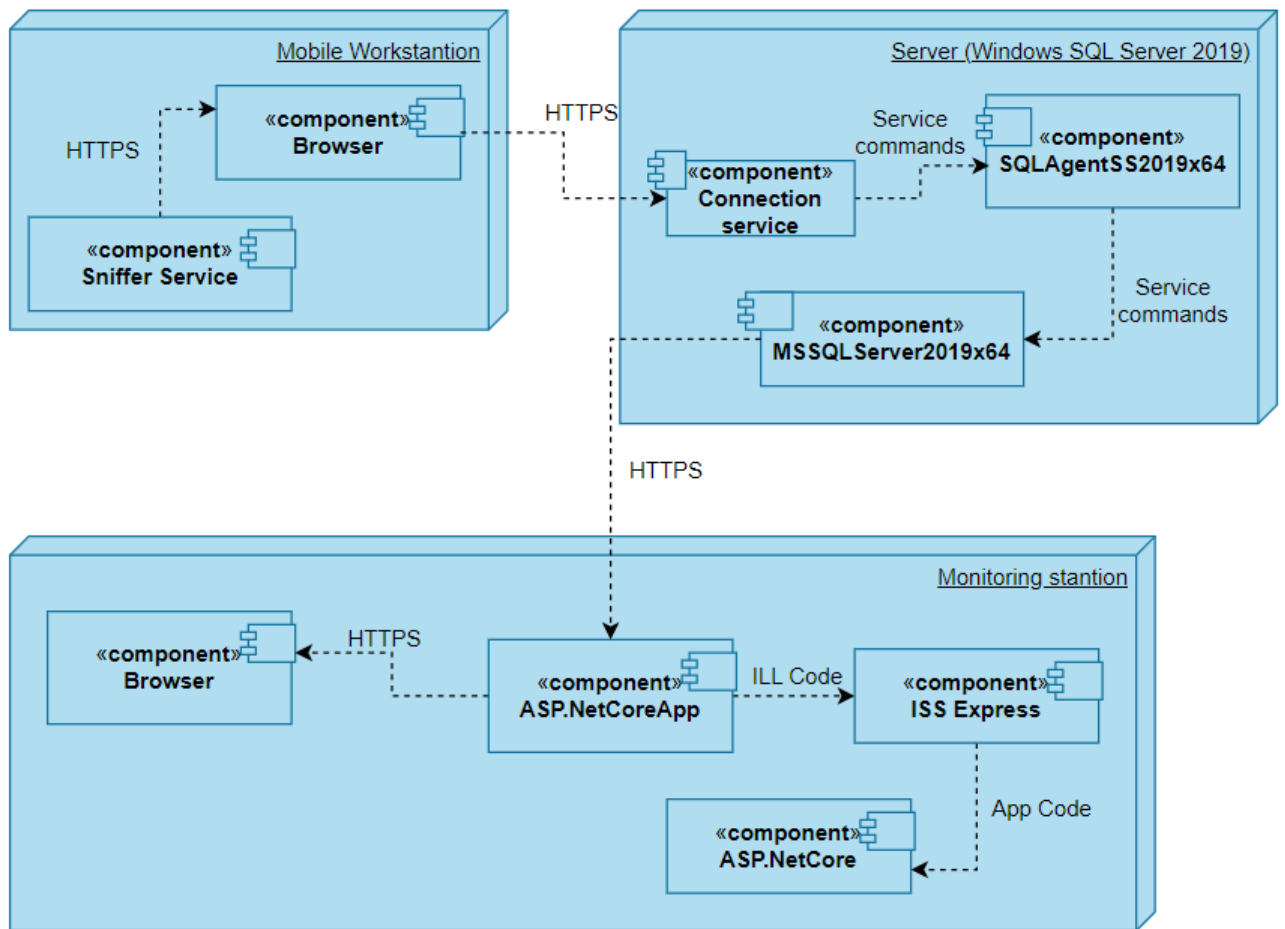


Рис. 3.33. Діаграма розгортання системи

Зовнішні сервіси: Додаткові сервіси або джерела даних можуть використовуватися системою Sniffer4D, такі як геопросторові сервіси для отримання географічних даних, API для отримання метеорологічних даних або сервіси візуалізації для створення графіків та діаграм.

### Висновки до розділу 3

1. Здійснено опис архітектури програмної системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту.

2. За допомогою UML діаграм активності основних процесів, Use-case діаграми варіантів використання системи, відповідних діаграм послідовності,

діаграм діяльності в межах реалізації системи, діаграм комунікації, основної та допоміжної діаграми класів, діаграм компонентів системи та діаграми розгортання визначено основні вимоги до системи для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту. Застосування зазначеного підходу дозволяє підвищити ефективність процесу розробки та використання бази математичних моделей із відповідними експериментальними даними для дослідження зазначеного типу об'єктів.

3. Описано основні особливості реалізації системи, зокрема з використанням об'єктно-орієнтованого підходу до програмування на базі мікросервісної архітектури з використанням технології .Net framework на мові програмування C#, а також СУБД MSSQL.



## **РОЗДІЛ 4**

### **ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАСПОРТУ**

В розділі описано організацію графічного інтерфейсу прикладного програмного забезпечення. Наведено вигляд основних модулів системи, які включають в себе різні функціональні частини програми. Кожен з цих модулів спрямований на забезпечення зручної та інтуїтивно зрозумілої взаємодії з користувачем.

Для перевірки системи було проведено інтеграційне тестування та тестування продуктивності. Для тестування програмного інтерфейсу було виконано такі групи тестів: позитивні тести, розширені позитивні тести з додатковими параметрами, негативні тести із валідними вхідними даними, негативні тести з невалідними вхідними даними, деструктивні тести, безпека, авторизація. Для тестування продуктивності було вибрано такі сценарії: логін користувача, експорт даних з мобільної станції, вибір місії, побудова ІРО, моделювання забруднення в ґрунті, моделювання забруднення у воді. За результати тестування програма система пройшла перевірку і успішно виконує свої функції.

Також було проведено оцінку ефективності системи на основі інтегральної оцінки яка складається з шести показників. В порівнянні з відомими рішеннями дана система забезпечує приріст інтегрального показника ефективності на 42.0%, що у 2 рази перевищує відносний приріст щодо ефективності систем моніторингу забруднення ґрунтів.

#### **4.1 Організація графічного інтерфейсу**

Для зручного та ефективного відслідковування та аналізу даних про забруднення ґрунтів розроблено графічний інтерфейс, який дозволить користувачам легко взаємодіяти з системою та здійснювати необхідні дії. Почнемо

зі сторінки входу. Як і в будь-якій програмі, дане вікно є важливою складовою системи моніторингу забруднення ґрунтів. Воно забезпечує безпечний і контрольований доступ до системи, розділяючи користувачів на два типи: адміністраторів і безпосередніх користувачів. Нижче подано детальний опис основних полів та графічних елементів на цій сторінці:

- логін – це поле, призначене для введення унікального ідентифікатора або імені користувача для входу в систему. Користувач повинен ввести свій правильний логін, який може бути призначений системою або ж користувачем під час реєстрації.

- пароль – у цьому полі користувач повинен ввести свій конфіденційний пароль, який забезпечує захищений доступ до його облікового запису. Пароль маскується для забезпечення додаткової безпеки.

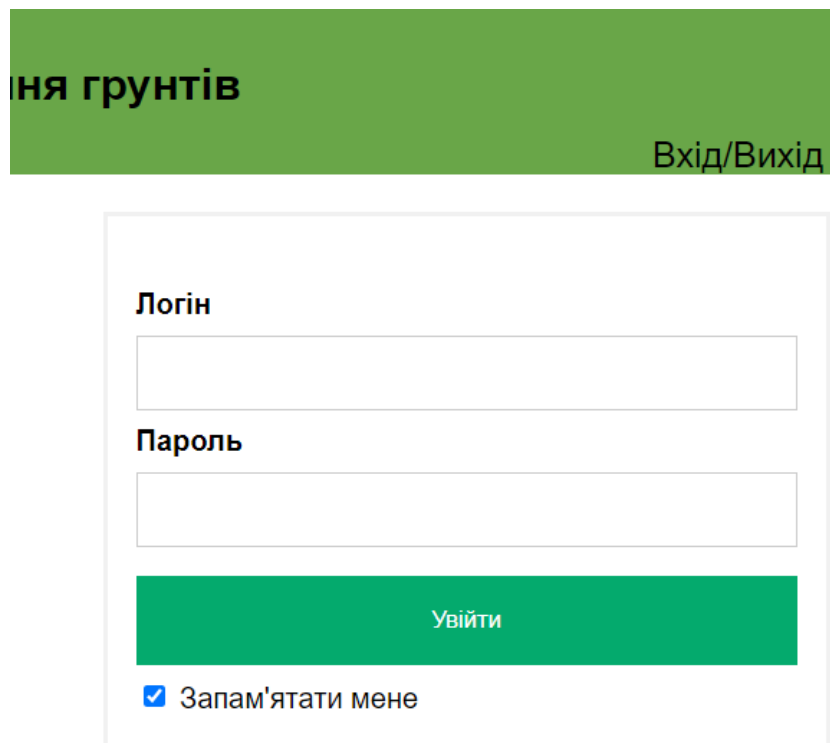
- кнопка "Увійти" – після введення логіну та пароля користувач натискає на цю кнопку, щоб здійснити процес авторизації в системі. Після натискання кнопки система перевіряє введені дані, і якщо вони вірні, дозволяє користувачеві увійти.

- чекбокс "Запам'ятати мене" – цей елемент дає можливість користувачеві обрати, чи бажає він, щоб його дані (логін та пароль) були збережені на цьому пристрої. Це зручно, якщо користувач не хоче вводити дані при кожному вході. Проте, це повинно застосовуватися тільки на власних персональних пристроях, а не на загальнодоступних або спільно використовуваних комп'ютерах, для забезпечення безпеки даних.

- лінк "Вхід/Вихід" – це двофункціональна лінка, яка змінює свою функцію в залежності від статусу користувача. Якщо користувач неавторизований, лінк може перенаправити його на сторінку входу, де він може ввести свої дані для авторизації. У разі авторизації лінка служить для виходу з облікового запису або закриття сеансу користувача, забезпечуючи вихід з системи.

Після успішної авторизації адміністратори та користувачі отримують доступ до відповідних функцій та можливостей системи моніторингу забруднення ґрунтів, залежно від їх ролі та прав доступу. Адміністратори можуть мати більше привілеїв

та можливостей для управління системою, тоді як безпосередні користувачі можуть використовувати систему для моніторингу та отримання інформації, відповідно до своїх потреб і прав доступу. Забезпечення безпечного та зручного входу в систему є важливим аспектом забезпечення захисту даних та ефективної роботи з моніторингом забруднення ґрунтів.



ня ґрунтів

Вхід/Вихід

Логін

Пароль

Увійти

Запам'ятати мене

Рис 4.1 – Сторінка входу в систему

Після входу в систему перед користувачем відкривається меню програми з такими розділами:

- Моделювання забруднення
- Математичні моделі
- Зовнішні інтеграції
- Налаштування

Тепер розглянемо кожен розділ детальніше. На рисунку 4.2 зображено загальний вигляд сторінки «Моделювання забруднення» де відображено результати експериментів.



Рис 4.2 – Сторінка «Моделювання забруднення»

З лівої сторони розташована секція «Дата експерименту», де можна переглянути попередні результати моделювання забруднення ґрунтів. Далі розташований графік, який відображає змодельовані концентрації діоксиду азоту в ґрунті навколо деяких точок. По осі ординат подано концентрації забруднень із множником  $10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , а по осі абсцис – віддалення від поверхні ґрунту в метрах.

У секції, яка розташована з правої сторони, відображено візуалізацію розподілу діоксиду азоту на поверхні ґрунту. Чим оранжевіший колір, тим більша концентрація шкідливої речовини, і як видно з рисунку, найбільше забруднення саме біля проїжджої частини.

Також можна зрозуміти, що забруднення найбільше відбувається навколо дорожніх магістралей, що підкреслює важливість контролю за викидами транспортних засобів та пошуку ефективних способів зниження викидів шкідливих речовин.

У результаті цих аналізів можна розробити та впровадити більш ефективні стратегії та заходи для збереження природи та здоров'я громадян. Інформація, представлена на цій сторінці, може послужити основою для подальших наукових досліджень і розробок у сфері охорони довкілля та здоров'я людей.

Далі розташований графік, який показує поле концентрацій діоксиду азоту на різних глибинах для точок спостереження(рисунок 4.3).

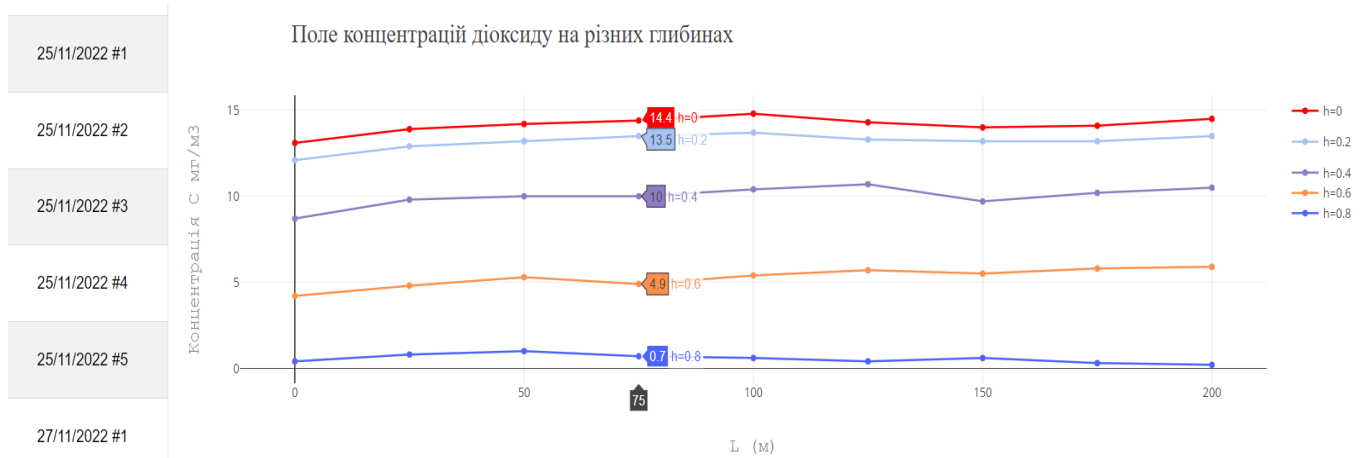


Рис 4.3 – Сторінка «Моделювання забруднення» (продовження)

На рисунку 4.4 зображено загальний вигляд сторінки «Математичні моделі»

**Система моніторингу забруднення ґрунтів**

Вхід/Вихід

Моделювання забруднення | **Математичні моделі** | Зовнішні інтеграції | Налаштування

**Побудова IPO**

Порядок дискретної динамічної моделі:

Вектор вхідних змінних:

Вектор параметрів моделі:

Вектор базисних функцій:

Вектор базисних функцій для параметрів:

**Структура інтервального різницевого оператора**

$$[\hat{v}_k] = g_0 + g_1 \cdot \hat{v}_{k-1} + g_2 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \hat{v}_{k-3} + g_3 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot u_{1,k}/u_{1,k-1} - g_4 \cdot \hat{v}_{k-2} \cdot u_{1,k-1}/u_{1,k+1}$$

**Оцінки параметрів моделі**

$$[\hat{v}_k] = 0.0365 + 0.3542 \cdot \hat{v}_{k-1} + 0.118 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \hat{v}_{k-3} + 0.5059 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot u_{1,k}/u_{1,k-1} - 0.0154 \cdot \hat{v}_{k-2} \cdot u_{1,k-1}/u_{1,k+1}$$

**Моделі дифузії**

Вибір точки:

Коефіцієнт дифузії двооксиду азоту у ґрунті:

Коефіцієнт дифузії двооксиду азоту у воді:

Рис 4.4 – Сторінка «Математичні моделі»

Дана сторінка складається з трьох секцій, які допомагають користувачеві будувати і використовувати інтервальні різницеві оператори для прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці забруднення та моделі дифузії для прогнозування забруднення в ґрунтах та ґрунтових водах. Розглянемо кожен секцію детальніше:

- Побудова ІРО (Інтервального різницевого оператора). В цій першій секції користувач вводить початкові умови для побудови різницевого оператора. Ці умови включають:
  - порядок дискретної динамічної моделі. Задається порядок системи різницевих рівнянь, що визначають динаміку концентрацій діоксиду азоту.
  - вектор вхідних змінних. Містить дані про вхідні параметри, які впливають на систему, наприклад, температуру, вологість тощо.
  - вектор параметрів моделі. Містить невідомі параметри, які потрібно ідентифікувати на основі експериментальних даних.
  - вектор базисних функцій. Використовується для апроксимації рішення різницевого рівняння в просторі вхідних змінних.

Після того, як користувач введе всі необхідні вхідні дані, система дозволяє побудувати інтервальний різницевий оператор.

- Вигляд інтервального різницевого оператора після структурної та параметричної ідентифікації. В цій секції відображається вигляд інтервального різницевого оператора після проведення структурної ідентифікації. Структурна ідентифікація дозволяє визначити структуру різницевого оператора на основі експериментальних даних і вхідних параметрів. Зокрема, цей крок може вмещувати вибір оптимального порядку динамічної моделі та відповідних базисних функцій. Після структурної ідентифікації система проводить параметричну ідентифікацію, під час якої визначаються значення невідомих параметрів моделі на основі експериментальних даних та виводиться на екран математична модель прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці.
- Моделі дифузії в ґрунті та воді. У третій секції відображаються математичні моделі для дифузії двоокису азоту (діоксиду азоту) в ґрунті та воді. Для обчислення рівня забруднення в конкретній точці користувач повинен вибрати цю точку і задати відповідний коефіцієнт дифузії для двоокису азоту в ґрунті або воді.

Загалом, сторінка «Математичні моделі» дозволяє користувачеві побудувати, ідентифікувати та використовувати математичні моделі для прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в забрудненій ділянці. Це важливий інструмент для вивчення та контролю забруднення довкілля та його впливу на здоров'я людей та природних екосистем.

Наступна сторінка – «Зовнішні інтеграції». На рисунку 4.5 проілюстровано перші дві секції – дата та номер польоту та таблиця даних з сенсора Sniffer 4D.

**Система моніторингу забруднення ґрунтів**

Моделювання забруднення    Математичні моделі    Зовнішні інтеграції

Дата та номер польоту

Дані з сенсора Sniffer 4D

Дата та час	Довгота	Широта	NO2 µg/m³	Темп °C	Вологість %	Тиск Pa
19/11/2021 #1						
21/11/2021 #1	25.560628820937410	49.601886314154569	41.372471	4.313725	81.176468	98767.546875
21/11/2021 #2	25.560626809280649	49.601886649430696	41.372471	4.313725	81.176468	98767.546875
22/11/2021 #1	25.560625468176141	49.601887487621013	41.372471	4.313725	81.176468	98767.546875
22/11/2021 #2	25.560624462347761	49.601888493449394	41.372471	4.313725	81.176468	98767.546875
22/11/2021 #3	25.560623959433570	49.601889331639711	41.842613	4.313725	81.176468	98767.546875
22/11/2021 #4	25.560624965261951	49.601889499277775	41.372471	4.313725	81.176468	98757.781250
	25.560625300538078	49.601889625006322	41.372471	4.313725	81.176468	98767.546875

Рис 4.5 – Сторінка «Зовнішні інтеграції» (дата та номер польоту та таблиця даних з сенсора Sniffer 4D)

Рисунок 4.7 відображає інтегроване програмне забезпечення Sniffer4D Маррег на сторінці «Зовнішні інтеграції».

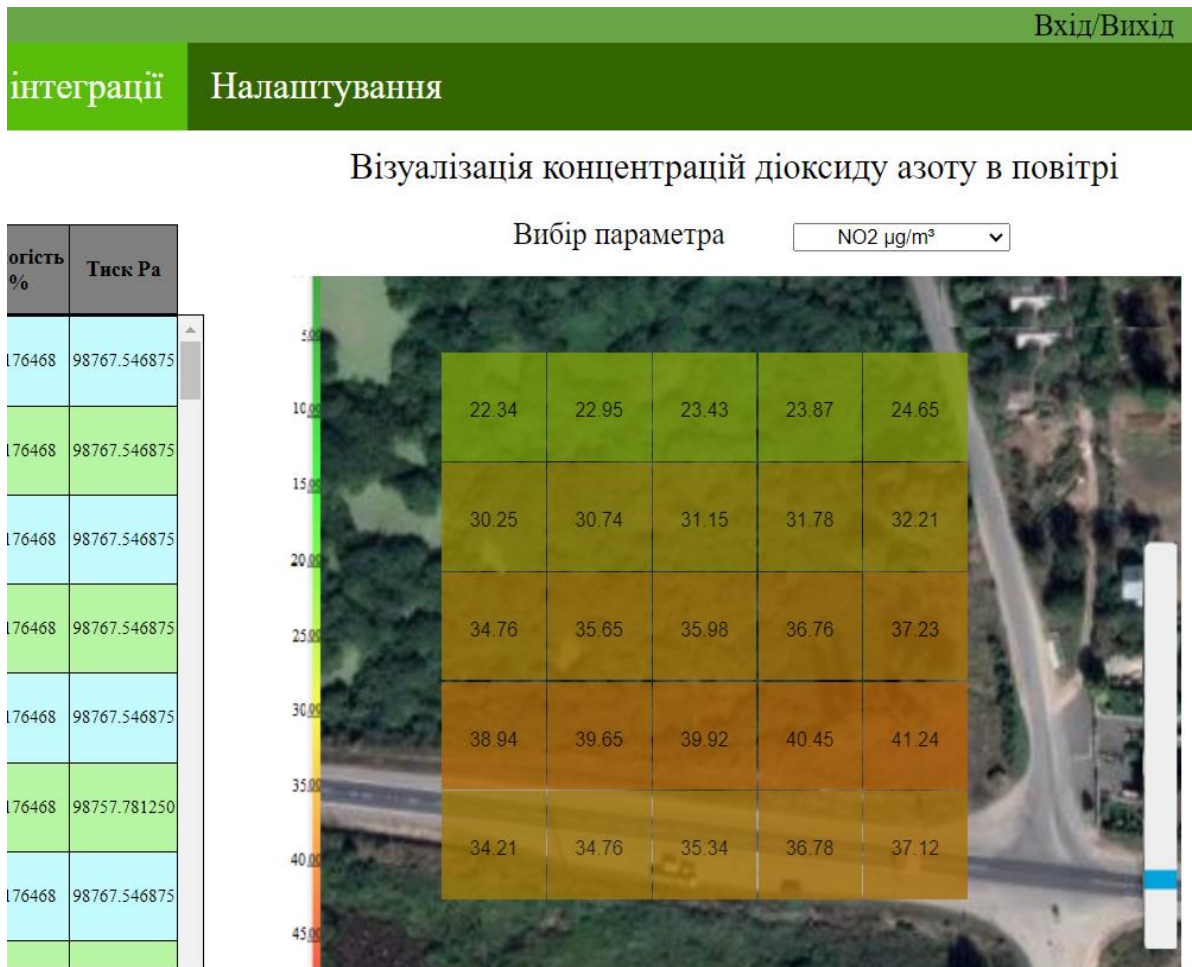


Рис 4.6 – Сторінка «Зовнішні інтеграції»(інтеграція програмного забезпечення Sniffer4D Mapper)

Сторінка зовнішніх інтеграцій містить три секції, які надають користувачеві зручний доступ до інформації про польоти квадрокоптера DJI Matrice M100 зі сенсором Sniffer 4D та зібраними даними.

Перша секція присвячена історії польотів квадрокоптера. Вона містить дані про дату та номер кожного польоту в порядку від новіших до старіших. Такий підхід дозволяє швидко переглядати історію польотів та вибирати потрібний для подальшого аналізу.

Друга секція містить таблицю з даними, отриманими з сенсора Sniffer 4D. Таблиця має такі поля: дата та час, довгота, широта, концентрація діоксиду азоту, температура, вологість та тиск. Оскільки сенсор записує дані кожну секунду, таблиця має вертикальний скрол, що дозволяє зручно переглядати значення даних для кожного відрізка часу. Користувач може вільно переміщатися по таблиці та



аналізувати дані за потреби.

Третя секція інтегрує програмне забезпечення Sniffer4D Mapper, що візуалізує дані про вимірювання концентрацій в приземному шарі атмосфери. Це візуалізовано на фоні карти, де відбувалися вимірювання. Карта може відображати різні типи параметрів, зокрема концентрацію діоксиду азоту, температуру, вологість та тиск. Користувач може вибрати бажаний тип параметру через комбобокс для подальшого аналізу. Крім того, візуалізація даних на карті дозволяє легко спостерігати за змінами параметрів в приземному шарі атмосфери і здійснювати аналіз залежностей.

Сторінка налаштування системи має дві секції, доступ до яких є обмежений лише для адміністраторів системи(рисунок 4.7).

Система моніторингу забруднення ґрунтів

Моделювання забруднення
Математичні моделі
Зовнішні інтеграції

Інформація про підключення до сервера бази

<b>IP адреса</b>	192.304.212.123
<b>Сервер бази даних</b>	MSSQLServer
<b>Користувач</b>	Admin
<b>Пароль</b>	*****
<b>Сервер</b>	WindowsSQLServer2019

Підключення до SnifferCloud

<b>Логін</b>	<input type="text"/>
<b>Пароль</b>	<input type="password"/>
<b>Порт</b>	COM3 ▾


Рис 4.7 – Сторінка «Налаштування»(Адміністратор)

Перша секція "Інформація про підключення до сервера бази даних" дозволяє

адміністраторам встановлювати з'єднання з віддаленою машиною, на якій розташовано сервер бази даних. Це важливий крок для забезпечення доступу до бази даних та управління нею. В даній секції можна ввести необхідні параметри підключення, такі як адреса сервера, порт, логін та пароль.

Друга секція "Підключення до SnifferCloud" призначена для налаштування зв'язку з дроном та калібрування сенсора. Ця функціональність дозволяє адміністраторам забезпечувати ефективну роботу дрона та правильну роботу його сенсорного обладнання. За допомогою цієї секції адміністратор може встановлювати параметри зв'язку з дроном та забезпечувати оптимальні умови для коректної роботи сенсора.

Таким чином, адміністратор має повний контроль над сторінкою налаштування системи та може виконувати необхідні налаштування для забезпечення її ефективної та безпечної роботи. Звичайні користувачі не мають можливості звертатися до цих секцій(рисунк 4.8).


Система моніторингу забруднення ґрунтів

Моделювання забруднення   Математичні моделі   Зовнішні інтеграції

Інформація про підключення до сервера бази

<b>IP адреса</b>	192.304.212.123
<b>Сервер бази даних</b>	MSSQLServer
<b>Користувач</b>	Admin
<b>Пароль</b>	*****
<b>Сервер</b>	WindowsSQLServer2019

Підключення до SnifferCloud

<b>Логін</b>	<input type="text"/>
<b>Пароль</b>	<input type="password"/>
<b>Порт</b>	COM3 ▾

Рис 4.8 – Сторінка «Налашування» (Користувач)

## 4.2 Тестування програмної системи

Тестування програмних систем є невід'ємною та незамінною складовою процесу розробки програмного забезпечення. Воно допомагає забезпечити якість, надійність та безпеку програм, що використовуються мільйонами користувачів у всьому світі. Ефективне тестування виявляє помилки та дефекти ще на ранніх етапах розробки, що дозволяє уникнути серйозних проблем та зберегти час та ресурси. Однією з головних переваг тестування є забезпечення високої якості продукту. Виконуючи різноманітні тестові сценарії, можна перевірити, чи працює програма правильно в різних умовах. Це дозволяє виявити та усунути помилки, забезпечуючи відповідність функціональних вимог та очікувань користувачів. Збільшення якості програмного забезпечення призводить до зниження кількості вразливостей та інцидентів із безпекою, а також для покращення досвіду користувача.

Тестування програмного забезпечення для моделювання забруднення ґрунту шкідливими викидами транспортних засобів, яке базується на математичних моделях, передбачає системний підхід для забезпечення якості, надійності та функціональності програмного забезпечення. Тестування API є важливим етапом його розробки, підтверджує безперервний зв'язок і обмін даними між різними компонентами програмного забезпечення, що дозволяє системі ефективно співпрацювати та надавати бажані функції. По-друге, це допомагає виявляти та виправляти проблеми сумісності, забезпечуючи гармонійну роботу API на різних платформах, пристроях і операційних системах. Ця сумісність забезпечує узгоджену взаємодію з користувачем і запобігає потенційним збоям, які можуть порушити роботу програми.

При взаємодії модулів системи через рівень API важливо забезпечити належну перевірку його коректної роботи. Комплексне тестування є ключовим для забезпечення надійності, ефективності та безпеки всієї системи, гарантуючи належну функціональність та досягнення бажаних результатів. Процес тестування повинен вміщувати перевірку кожного API запиту і виконувати такі кроки:

- Перевірка коду статусу HTTP. Наприклад, створення ресурсу повинно повертати 201 CREATED, а недопущені запити – 403 FORBIDDEN тощо.
- Перевірка вмісту відповіді. Перевірка коректного формату JSON-тіла та правильності назв полів, типів і значень, включаючи відповіді з помилками.
- Перевірка заголовків відповіді, оскільки заголовки HTTP-сервера мають вплив на безпеку та продуктивність.

А для повного тестування API системи було виконано такі групи тестів у наведеному нижче порядку:

- Основні позитивні тести.
- Розширені позитивні тести з додатковими параметрами.
- Негативні тести із валідними вхідними даними.
- Негативне тестування з невалідними вхідними даними.
- Деструктивні тести.
- Безпека, авторизація.

В таблиці 4.1 наведено тестові сценарії для тестування програмного інтерфейсу системи моніторингу забруднення ґрунтів

Таблиця 4.1

## Тестові сценарії для перевірки API

Тестові категорії	Тестові сценарії
Основні позитивні тести	- Ендпоінт виконує своє основне призначення
Негативні тести із валідними вхідними даними	- Створення ресурсу із назвою, яка вже існує - Видалення неіснуючого ресурсу - Оновлення ресурсу незаконними дійсними даними (наприклад, перейменувати конфігурацію на існуючу назву)

## Продовження таблиці 4.1

Негативне тестування з невалідними вхідними даними	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Відсутній або недійсний токен авторизації</li> <li>- Відсутні необхідні параметри для запиту</li> <li>- Недійсне значення для параметрів ендпоінту</li> <li>- Недійсний UUID у шляху або параметрах запиту</li> <li>- Тіло запиту з недійсною моделлю (порушує схему)</li> <li>- Тіло запиту з неповною моделлю (відсутні поля або необхідні вкладені сутності)</li> <li>- Недійсні значення в полях вкладених сутностей</li> <li>- Недійсні значення в заголовках HTTP</li> </ul>
Деструктивні тести	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ширша форма негативного тестування, коли навмисно намагаємося зламати API, щоб перевірити його надійність (наприклад, надсилаючи величезне тіло запиту, намагаючись переповнити систему).</li> </ul>
Безпека, авторизація	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Переконайтесь, що API розроблено відповідно до правильних принципів безпеки: заборона за замовчуванням, безпечна помилка, принцип найменших привілеїв, відхилення всіх незаконних введень тощо. <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Позитивний: впевнитись, що API відповідає на правильну авторизацію за допомогою всіх узгоджених методів</li> </ul> </li> </ul>

Продовження таблиці 4.1

	<p>автентифікації – маркер носія, файли cookie і т.д.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Негативний: впевнитись, що API відхиляє всі неавторизовані виклики</li></ul> <p>- Впевнитись, що ендпоінти доступні для користувача на основі ролі. API повинен відхиляти виклики ендпоінтів, які не дозволені для ролі користувача</p> <p>- Впевнитись, що внутрішні представлення даних, не витікають за межі загальнодоступного API у тілі відповіді</p>
--	---

На рисунку 4.9 наведено приклад роботи запиту get user в програмі Postman. Як видно, з рисунку було протестовано перевірку правильності статус коду(status code is 200), вмісту відповіді(schema is valid) та заголовки відповіді(Content-Type присутній у заголовку). В загальному API інтерфейс пройшов 123 із 123 кейсів.

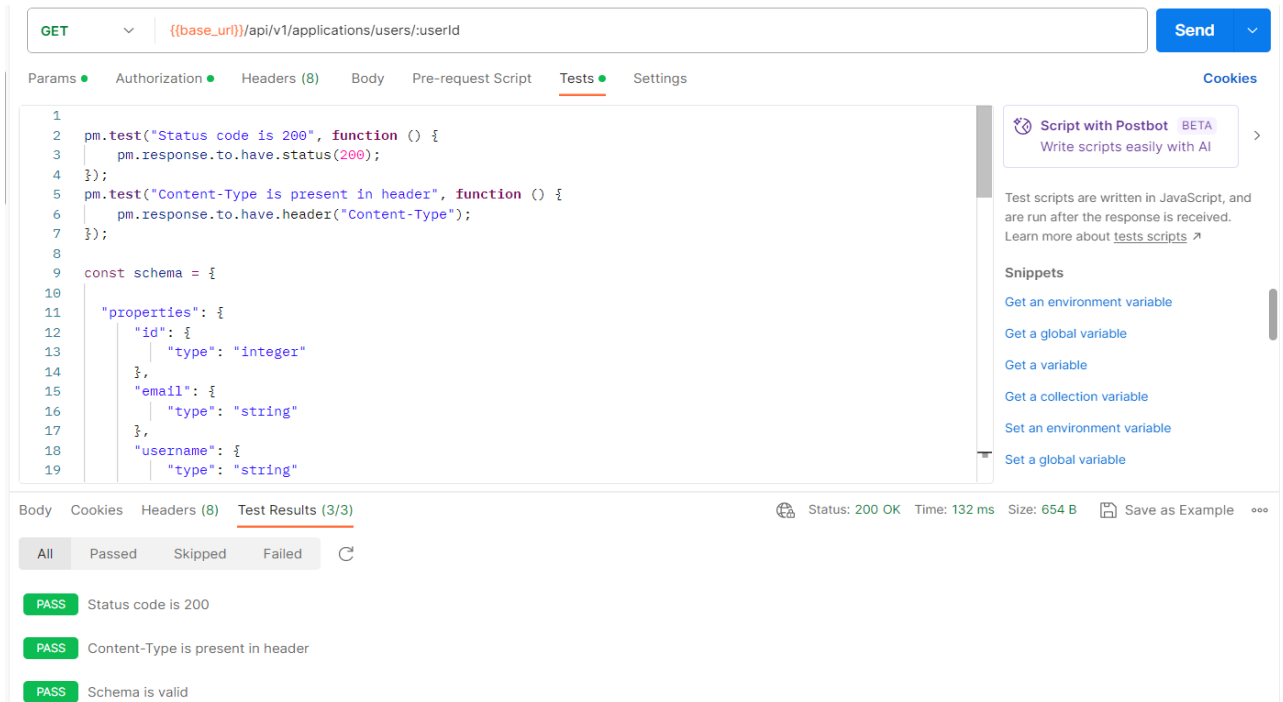


Рис. 4.9 – Результат виконання тестів для запиту get user

Наступним видом тестування, яке було проведено, є тестування продуктивності. Даний вид тестування є важливим для програмних систем та забезпечення оптимальної функціональності програм. Це допомагає виявити потенційні вузькі та слабкі місця в архітектурі системи, гарантуючи, що вона може обробляти очікуване навантаження користувачів і одночасно різні активності. Шляхом імітації реальних сценаріїв використання тестування продуктивності перевіряє час відгуку, використання ресурсів і масштабованість, таким чином, запобігаючи збоям або уповільненням під час інтенсивного використання. Оскільки система моніторингу працює з доволі великими об'ємами даних, то тестування продуктивності допомагає точно визначити області для оптимізації та налаштування, підвищуючи загальну ефективність системи та знижуючи операційні ризики. Для цього було визначено такі тестові метрики:

- Час відповіді
  - середній
  - медіана
  - 90 перцентиль
  - 95 перцентиль
  - 99 перцентиль
- Частота помилок
- Пропускна здатність

Після чого розроблено наступні тестові сценарії:

- Логін користувача
- Експорт даних з мобільної станції
- Вибір місії
- Побудова IPO
- Моделювання забруднення в ґрунті
- Моделювання забруднення у воді

У таблиці 4.2 наведено результати тестування продуктивності системи.

Таблиця 4.2

## Результати тестування продуктивності системи

Лейбл	К-сть	Середнє (мс)	Медіана (мс)	90 перцентиль (мс)	95 перцентиль (мс)	99 перцентиль (мс)	Частота помилок %	Пропускна здатність 1/сек
Логін	20	2019	1888	1421	1838	1600	0.0	0.18
Вибір місії	100	2826	1676	2050	2567	3364	0.0	0.20
Побудова IPO	150	3296	3241	3826	3104	3832	0.0	0.23
Експорт даних	150	3479	3686	3125	3320	3948	0.0	0.27
Моделювання (грунт)	180	4349	4312	4419	4554	4907	0.0	0.35
Моделювання (вода)	180	4119	3888	4421	4838	4900	0.0	0.38

Як видно з таблиці 4.2, всі запити виконано з рівнем помилок 0% (без помилок), проте запити для моделювання забруднення обробляються найдовше(10мс). Це може свідчити про високу складність алгоритмів для обробки даних запитів, проте, враховуючи великий об'єм даних для опрацювання така тривалість є допустимою. Для проведення тестування було використано інструмент Apache JMeter (рисунок 4.10), де було написано відповідні тестові скрипти.

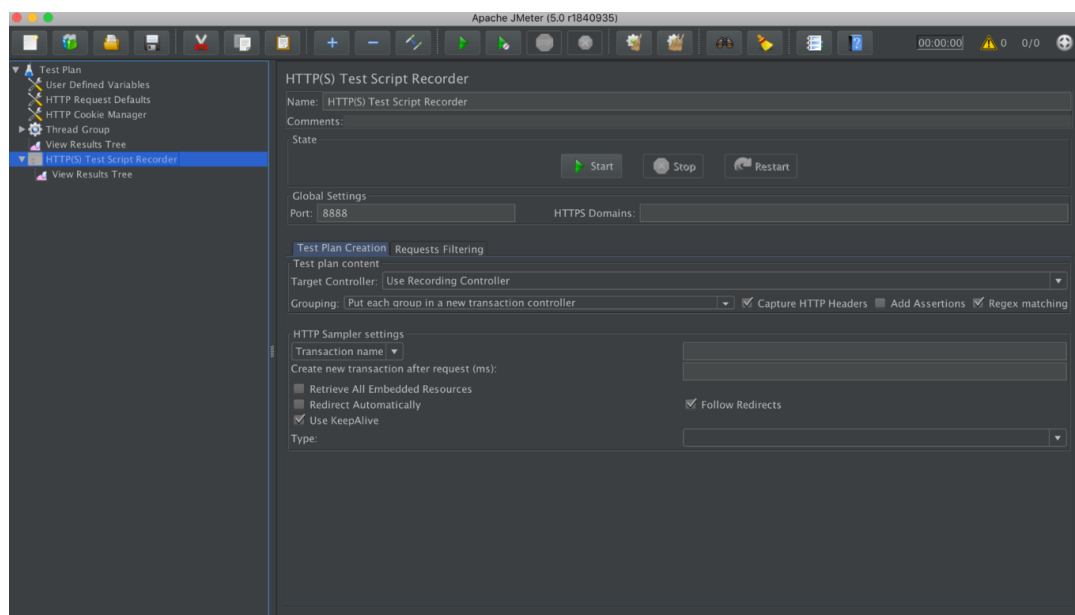


Рис. 4.10 – Виконання тестів в програмі Apache JMeter



### 4.3 Ефективність системи

Після аналізу особливостей програмної реалізації запропонованої технології моніторингу забруднення ґрунтів SPMS (Soil pollution monitoring system) доцільно розглянути питання оцінки її ефективності. Особливого значення набуває порівняння ефективності розробленої системи із основними представниками системи моніторингу забруднення ґрунтів, яка володіє диференціюючими властивостями на аналізованій множині систем. Оскільки згадана система інтегральної оцінки включає шість показників, які визнаються рівноправними, кожен із показників зручно представляти його вкладом в інтегральну оцінку. При цьому його максимальне значення складатиме 16.67%. Якщо показник фігурує в системі, то його значення приймаємо за 1, якщо він відсутній, то 0, а якщо частково реалізований – 0.5.

На основі проведеного в першому розділі дисертаційної роботи аналізу факторів, які впливають на ефективність систем моніторингу забруднення ґрунтів виділено ключові показники, які формують інтегральний показник ефективності.

Розглянемо ці фактори більш детально. Показник «Аналітика та звітність» *Az*.

Аналітика та звітність в інформаційних системах моніторингу забруднення ґрунтів є критичними компонентами для ефективного контролю та управління якістю ґрунту та забрудненням ним. Ці системи допомагають збирати, аналізувати та представляти дані щодо забруднення ґрунтів для прийняття рішень, виявлення тенденцій та визначення необхідних заходів для збереження та відновлення природних ресурсів.

Основні елементи аналітики та звітності в інформаційних системах моніторингу забруднення ґрунтів включають:

- збір та акумуляція даних: інформаційна система повинна здати засоби для збору даних про забруднення ґрунту, такі як вміст хімічних сполук (наприклад, важких металів, пестицидів, нафти), фізичні характеристики ґрунту (текстура, рН), місцезнаходження та інші важливі параметри.

- аналіз даних: система повинна мати можливість проводити аналіз даних для виявлення забруднень, визначення їхнього походження, визначення ризиків та ідентифікації впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей.
- візуалізація даних: створення графіків, карт, діаграм та інших візуальних засобів для представлення даних у зрозумілій формі для аналітиків, владних органів, громадськості та інших зацікавлених сторін.
- звітність: генерація звітів та документів, які містять результати моніторингу, аналіз ризиків, рекомендації щодо зменшення забруднення та стратегії відновлення ґрунту. Ці звіти можуть бути використані для інформування громадськості та прийняття рішень на різних рівнях управління.
- моделювання та передбачення: інформаційні системи можуть використовувати дані для створення моделей та передбачень щодо майбутнього розвитку забруднення ґрунту та ефективності запропонованих заходів.
- моніторинг та сповіщення: автоматичні системи моніторингу можуть надавати сповіщення в реальному часі або у вигляді регулярних звітів про виявлені зміни в стані ґрунту, які потребують негайного втручання.
- інтеграція з ГІС: інтеграція з геоінформаційними системами дозволяє ефективно відображати дані на картах та аналізувати їх у географічному контексті.

Виходячи із проведеного аналізу, показник  $Az$  визначаємо наступним співвідношенням:

$$Az = \begin{cases} 0, & \text{якщо показник не реалізований;} \\ 0.5, & \text{якщо показник частко реалізований;} \\ 1, & \text{якщо показник реалізований.} \end{cases} \quad (4.1)$$

Показник «Збір даних онлайн»  $Zo$ . Збір даних онлайн в інформаційних системах моніторингу забруднення ґрунтів може бути важливим для забезпечення швидкого доступу до актуальних інформаційних ресурсів та відстеження змін у реальному часі. Ось декілька способів, які можна використовувати для збору даних

онлайн в таких системах:

- сенсорні мережі: встановлення сенсорів в ґрунті для вимірювання різних параметрів, таких як рівень забруднення, рН, вологість, температура тощо. Дані з сенсорів можуть бути передані через бездротове з'єднання (наприклад, Wi-Fi або LoRaWAN) до центральної системи, де вони обробляються та аналізуються в реальному часі.

- мобільні додатки: розробка мобільних додатків для смартфонів і планшетів, які дозволяють користувачам внести дані про забруднення ґрунту, використовуючи камеру для фотографій або GPS для визначення місця розташування. Ці дані можуть автоматично надсилатися на сервер для аналізу.

- веб-портали для внесення даних: створення веб-порталів, на яких оператори моніторингу можуть вручну вносити дані про забруднення ґрунту через веб-інтерфейс. Це може бути корисним для організацій або волонтерських груп, які займаються збором інформації.

- автоматизовані системи збору даних: встановлення автоматизованих систем, які здійснюють постійний моніторинг стану ґрунту і передають дані в реальному часі через мережу передачі даних (наприклад, через мережу 4G або 5G) до центральної системи.

- інтернет речей (IoT): використання технології IoT для підключення до мережі різних сенсорів та пристроїв, які збирають дані про ґрунт. Ці дані можуть бути збережені в хмарних обчисленнях та легко доступні через веб-інтерфейс.

- використання сучасних аналітичних інструментів: зібрані дані можуть бути оброблені та аналізовані за допомогою сучасних аналітичних інструментів, таких як машинне навчання та штучний інтелект, для виявлення забруднень та прогнозування їхнього розвитку.

Збір даних онлайн в інформаційних системах моніторингу забруднення ґрунтів допомагає швидко реагувати на негативні зміни в ґрунті, визначати джерела забруднення та впроваджувати необхідні заходи для збереження та відновлення екологічної стійкості ґрунтів.

Виходячи із проведеного аналізу, показник  $Z_0$  визначаємо наступним

співвідношенням:

$$Z_0 = \begin{cases} 0, & \text{якщо показник не реалізований;} \\ 0.5, & \text{якщо показник частко реалізований;} \\ 1, & \text{якщо показник реалізований.} \end{cases} \quad (4.2)$$

Показник «Підтримка додаткових параметрів»  $P_0$ . Підтримка додаткових параметрів в інформаційних системах моніторингу забруднення ґрунтів дозволяє розширити функціональність та точність цих систем, а також враховувати різноманітні фактори, які впливають на стан ґрунту. Ось деякі засоби та параметри, які можуть бути враховані в інформаційних системах моніторингу забруднення ґрунтів:

- типи забруднень: система повинна підтримувати можливість визначення різних типів забруднень, таких як хімічні забруднення, бактеріальні інфекції, вплив сміття або інших матеріалів.
- хімічний склад: додаткові параметри можуть включати в себе вимірювання концентрацій певних речовин у ґрунті, таких як важкі метали, органічні сполуки, азотні сполуки тощо.
- геологічні характеристики: інформаційна система може включати в себе дані про геологічну структуру ґрунту, його товщину, типи порід тощо.
- фізичні параметри: додаткові параметри можуть включати в себе вимірювання вологості ґрунту, температури, текстури ґрунту тощо.
- метеорологічні дані: система може враховувати метеорологічні умови, такі як опади, температуру повітря і вітер, оскільки ці фактори можуть впливати на розповсюдження забруднень.
- географічна інформація: враховування географічної інформації, включаючи географічні координати ділянок моніторингу, дозволяє точно визначити місцезнаходження забруднень.
- історичні дані: зберігання історичних даних дозволяє виявити зміни в стані ґрунту протягом часу та визначити тенденції.

- додаткові параметри за вимогою: система повинна бути гнучкою і дозволяти додавати нові параметри, які можуть виникнути як відповідь на нові вимоги або дослідження.
- управління даними: забезпечення можливості зберігання, архівування та резервного копіювання даних для подальшого аналізу та звітності.
- інтеграція з іншими системами: можливість інтеграції з іншими інформаційними системами, такими як ГІС, дозволяє використовувати дані з різних джерел для більш повного аналізу.

Забезпечення підтримки додаткових параметрів в інформаційних системах моніторингу забруднення ґрунтів допомагає отримувати більш точну та повну інформацію про стан ґрунту та дозволяє приймати більш обґрунтовані рішення щодо охорони навколишнього середовища.

Виходячи із проведеного аналізу, показник  $Po$  визначаємо наступним співвідношенням:

$$Po = \begin{cases} 0, & \text{якщо показник не реалізований;} \\ 0.5, & \text{якщо показник частко реалізований;} \\ 1, & \text{якщо показник реалізований.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Показник «Масштабованість»  $Ms$ . Масштабованість інформаційних систем моніторингу забруднення ґрунтів - це їхня здатність розширюватися або зменшуватися в залежності від потреб та обсягу обробки даних. Важливо мати масштабовану систему, яка може адаптуватися до зростаючого обсягу даних, забезпечуючи при цьому ефективну роботу та продуктивність. Ось деякі аспекти масштабованості інформаційних систем моніторингу забруднення ґрунтів:

- горизонтальна масштабованість: ця форма масштабованості включає додавання нових фізичних або віртуальних серверів, щоб обробити зростаючий обсяг даних та завдань. Це дозволяє розподілити навантаження та підвищити продуктивність системи при збереженні стійкості та доступності.
- вертикальна масштабованість: ця форма масштабованості полягає в

покращенні окремих компонентів системи, щоб збільшити їхню продуктивність і потужність. Наприклад, підвищення обсягу оперативної пам'яті чи кількості процесорних ядер на серверах.

- автоматичне масштабування: система повинна мати можливість автоматичного виявлення збільшення навантаження та самостійного масштабування ресурсів для забезпечення ефективності. Це може включати автоматичне розгортання нових серверів або збільшення обсягу ресурсів в хмарних обчисленнях.

- розділення обов'язків (Microservices): розробка системи на основі мікрослужб (microservices) дозволяє розділити функціональність системи на невеликі, незалежні компоненти, які можуть бути розвинуті, масштабовані та підтримувані окремо.

- балансування навантаження: використання балансувальників навантаження, які розподіляють запити між різними серверами, допомагає забезпечити рівномірне розподілення роботи і запобігає перевантаженню окремих серверів.

- оптимізація бази даних: велика кількість даних може призвести до перевантаження бази даних. Оптимізація структури бази даних та використання кешування може покращити продуктивність.

- зберігання та обробка даних в реальному часі: масштабованість системи моніторингу забруднення ґрунтів також повинна враховувати здатність обробляти дані в реальному часі та надавати швидку зворотну інформацію.

- безпека та доступність: при масштабуванні системи важливо забезпечити безпеку даних і надійність доступу до них, щоб уникнути потенційних загроз і втрати інформації.

Масштабованість інформаційної системи моніторингу забруднення ґрунтів допомагає забезпечити її здатність працювати ефективно в умовах зростаючого обсягу даних і вимог користувачів, зберігаючи при цьому стійкість і доступність сервісу.

Виходячи із проведеного аналізу, показник *Ms* визначаємо наступним

співвідношенням:

$$M_S = \begin{cases} 0, & \text{якщо показник не реалізований;} \\ 0.5, & \text{якщо показник частко реалізований;} \\ 1, & \text{якщо показник реалізований.} \end{cases} \quad (4.4)$$

«Стійкість до зовнішніх факторів»  $S_z$ . Стійкість до зовнішніх факторів в інформаційних системах моніторингу забруднення ґрунтів - це важлива характеристика, яка дозволяє системі продовжувати свою роботу навіть у важких або непередбачуваних умовах. Ось деякі способи забезпечення стійкості інформаційних систем моніторингу забруднення ґрунтів до зовнішніх факторів:

- резервне копіювання та відновлення даних: здійснення регулярного резервного копіювання даних та наявність механізмів відновлення дозволяють відновити систему в разі виходу із строю або втрати даних внаслідок зовнішніх факторів, таких як технічні неполадки або кібератаки.
- географічна розподіленість: розміщення резервних серверів та даних у різних географічних областях дозволяє зменшити ризик втрати даних через природні катастрофи, такі як повені, землетруси або пожежі.
- захист даних: застосування сучасних методів шифрування та безпеки допомагає захищати дані від несанкціонованого доступу та крадіжки.
- автентифікація та авторизація: використання механізмів автентифікації та авторизації допомагає запобігти несанкціонованому доступу до системи та даних.
- моніторинг та реагування: постійний моніторинг стану системи та виявлення аномалій дозволяють реагувати на проблеми та небезпеки в реальному часі, сприяючи підтримці стабільної роботи системи.
- відмовостійкість (failover): механізми відмовостійкості дозволяють автоматично перемикати роботу на резервні ресурси у випадку відмови або несправності основних компонентів системи.
- фізична безпека: захист фізичного обладнання та серверних приміщень

від зовнішніх факторів, таких як пожежі, повені та доступ несанкціонованих осіб.

- планування бізнес-продовження (Business Continuity Planning - BCP) і планування відновлення після катастрофи (Disaster Recovery Planning - DRP): розробка та реалізація BCP і DRP допомагають системі відновити свою роботу після непередбачених подій або кризових ситуацій.
- оновлення та патчі: регулярне оновлення програмного забезпечення та встановлення патчів для виправлення вразливостей допомагає зберегти безпеку системи від кіберзагроз.

Виходячи із проведеного аналізу, показник  $Sz$  визначаємо наступним співвідношенням:

$$Sz = \begin{cases} 0, & \text{якщо показник не реалізований;} \\ 0.5, & \text{якщо показник частко реалізований;} \\ 1, & \text{якщо показник реалізований.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Показник «Вартість»  $V_s$ . Показник вартості інформаційних систем моніторингу забруднення ґрунтів визначає вартість розробки, впровадження та експлуатації такої системи. Вартість інформаційної системи може бути важливим фактором при прийнятті рішення щодо її створення та використання. Основні компоненти вартості інформаційної системи моніторингу забруднення ґрунтів включають:

Розробка та налагодження: Вартість розробки системи, включаючи оплату інженерів, розробників програмного забезпечення, аналітиків, тестувальників та інших фахівців, які беруть участь у проекті. Це також може включати витрати на апаратне та програмне забезпечення, а також на розробку інтерфейсу користувача.

Інтеграція з існуючими системами: Вартість інтеграції нової системи з існуючими інформаційними системами, які вже використовуються в організації.

- впровадження: витрати на встановлення та налаштування обладнання, програмного забезпечення та мережевої інфраструктури для системи моніторингу.
- операційні витрати: вартість щоденної експлуатації, включаючи оплату



персоналу, обслуговування обладнання, витрати на комунікацію та зберігання даних.

- підтримка та обслуговування: витрати на підтримку та вдосконалення системи, включаючи виправлення помилок, встановлення патчів, оновлення та підтримку користувачів.
- навчання персоналу: вартість навчання персоналу, який використовуватиме систему моніторингу.
- ліцензії та вартість програмного забезпечення: витрати на ліцензії для програмного забезпечення, яке використовується у системі, а також вартість самого програмного продукту, якщо він покупається.
- інфраструктура хмарних обчислень або обладнання: якщо система базується на хмарних обчисленнях, то вартість облікових записів в хмарних службах або купівля та обслуговування серверів і обладнання.
- вартість додаткових послуг із забезпечення безпеки та консультування: це може включати в себе вартість послуг з кібербезпеки, аудиту, правової підтримки тощо.
- вартість масштабування: якщо система має можливість масштабування, то вартість розширення її функціональності та ресурсів може бути також включена в загальну вартість.

Важливо бути уважним при оцінці вартості інформаційної системи моніторингу забруднення ґрунтів, оскільки це допоможе забезпечити фінансову стійкість проекту і раціонально розпорядитися ресурсами.

Виходячи із проведеного аналізу, показник  $V_s$  визначаємо наступним співвідношенням:

$$V_s = \begin{cases} 0, & \text{якщо вартість висока;} \\ 0.5, & \text{якщо показник вартості середній;} \\ 1, & \text{якщо показник невисокий.} \end{cases} \quad (4.6)$$

На основі запропонованих показників отримуємо інтегральний показник ефективності  $IEf$  систем моніторингу забруднення ґрунтів, який можна представити за допомогою наступної формули

$$IEf = \frac{(Az+Po+Zo+Ms+Sz+Vs)}{n}, \quad (4.7)$$

де  $n$  - загальна кількість показників.

В даному підрозділі на основі системи показників (4.1-4.7), описаної в підрозділі 4.4, проведено дослідження ефективності розробленої системи із основними відомими системами моніторингу забруднення ґрунтів, в результаті якого встановлено переваги розробленої системи над відомими рішеннями. В перелік досліджуваних систем були включені:

Лабораторія iCAP RQ ICP-MS - це лабораторне обладнання, яке використовується для проведення аналізу різних речовин та елементів у різних зразках за допомогою індуктивно зв'язаної плазми мас-спектрометрії (ICP-MS).

Спектрофотометр Nash DR6000 - це аналітичний прилад, призначений для вимірювання поглинання світла різними рідинами та розчинами з метою визначення концентрації певних речовин або параметрів води. Цей прилад широко використовується в лабораторіях, особливо у водних лабораторіях, для аналізу водних зразків та визначення параметрів якості води.

Система Dräger X-am 3500 - це переносний газовий аналізатор, розроблений для виявлення та моніторингу різних небезпечних газів та парів в атмосферному повітрі. Цей прилад часто використовується в промислових, екологічних та охороні здоров'я для контролю за наявністю шкідливих газів та оцінки потенційних ризиків для працівників та навколишнього середовища.

В таблиці 4.3. представлено результати оцінювання основних показників, які формують інтегральний показник ефективності для досліджуваних типів систем.

Виходячи з аналізу кількісних показників оцінок систем моніторингу забруднення ґрунтів, проведено розрахунок інтегрального показника ефективності.

Технологія SPMS у порівнянні з відомими рішеннями забезпечує приріст інтегрального показника ефективності на 42.0%, що у 2 рази перевищує відносний приріст щодо ефективності систем моніторингу забруднення ґрунтів. Результати представлено на рисунку 4.11.

Таблиця 4.3.

## Оцінювання ефективності систем моніторингу забруднення ґрунтів

Системи / Показники	Лабораторія iCAP RQ ICP-MS	Спектрофотометр Hach DR6000	Drager X- am 3500soil pollution monitoring system	SPMS (Soil pollution monitoring system)
Аналітика та звітність	0.5	1	0.5	0.5
Збір даних онлайн	0	0	0	1
Підтримка додаткових параметрів	1	0.5	0.5	-
Масштабованість	0	-	0	1
Стійкість до зовнішніх факторів	0.5	0	0	1
Вартість	0	0	0	1



Рис. 4.11 – Порівняння систем моніторингу забруднення ґрунтів на основі інтегрального показника ефективності

#### Висновки до розділу 4

1. Наведено вигляд графічного інтерфейсу прикладного програмного забезпечення для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами автотранспорту. Описано модулі системи з точки зору взаємодії з різними типами користувачів та зовнішніх інтеграцій.

2. Проведено інтеграційне тестування та тестування продуктивності системи. Визначено групи тестів та відповідні тестові сценарії які потрібні для перевірки API. За результатами перевірки зовнішній інтерфейс пройшов 123 із 123 тестів. Результати тестування продуктивності підтвердили успішну роботу програми оскільки усі тести пройшли з показником 0% помилок.

3. Після аналізу кількісних показників оцінки систем моніторингу забруднення ґрунту було розраховано інтегральний показник ефективності. У порівнянні з іншими відомими рішеннями у цій галузі, технологія SPMS демонструє приріст інтегрального показника ефективності на 42.0%. Ця цифра вдвічі перевищує відносний ріст ефективності, який був зафіксований в існуючих системах моніторингу забруднення ґрунту.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-технічне завдання розробки математичного та програмного забезпечення для моніторингу забруднення ґрунтів та ґрунтових вод шкідливими викидами автотранспорту, зокрема діоксиду азоту, внаслідок їх дифузії у ґрунт та взаємодії із водою. При цьому отримано такі наукові та практичні результати.

1. Проведено аналіз методів та засобів оцінювання рівня забруднення ґрунтів. Встановлено, що моделювання та прогнозування на основі диференціальних рівнянь в частинних похідних, або їх різницевих аналогів наслідків забруднення ґрунтів та ґрунтових вод через абсорбцію газоподібних речовин ґрунтом є найбільш прийнятним підходом в задачах моніторингу забруднення довкілля. Показано, що такий підхід вимагає постійного моніторингу забруднення ґрунтів на ґрунтових вод із використанням інформаційно-вимірювальних систем, вартість яких є надзвичайно високою. Напротивагу цьому, вартість інформаційно-вимірювальних систем для моніторингу шкідливих викидів автотранспорту у повітря є розв'язаною задачею. На цій підставі обґрунтовано та запропоновано для моніторингу забруднення ґрунтів та ґрунтових вод шкідливими викидами автотранспорту, використовувати вимірювання концентрації діоксиду азоту у поверхневому шарі повітря і подальшого моделювання процесів його дифузії та взаємодії із водою у ґрунтах та ґрунтових водах.

2. Обґрунтовано та розроблено метод математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту. Запропонований метод, на відміну від існуючих, ґрунтується на диференціальних рівняннях в частинних похідних із початковими умовами, заданими за результатами вимірювань концентрації забруднюючих речовин у газоподібному стані на поверхні ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів та здешевлення процесів моніторингу забруднення ґрунтів.

3. На основі розробленого методу побудовано математичні моделі розподілу концентрації сполук азотної кислоти та супутніх солей у ґрунтах у

вигляді диференціальних рівнянь з розподіленими параметрами за початкових умов, визначених за результатами вимірювань концентрацій діоксиду азоту у вихлопних газах автотранспорту. Отримано розподіл концентрацій забруднень для ґрунту та води в околах окремих точок спостережень, а також розподіл концентрації забруднень в околах пари точок спостережень підсистем типу водойма-узбережжя. Встановлено, що значимі проникнення забруднень в газоподібному стані припиняються практично на глибині 10 сантиметрів, що повністю відповідає фізичним явищам абсорбції у чорноземних ґрунтах. Для ідентифікації отриманих математичних моделей використано методи аналізу інтервальних даних та еволютивні алгоритми на основі поведінкових моделей бджолої колонії. Використання такого підходу забезпечило високі прогностичні властивості та гарантовану точність отриманих моделей 15%, що визначається похибками давачів вимірювань.

4. Розроблено архітектуру програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує програмне забезпечення інформаційно-вимірювального комплексу, засоби математичного моделювання процесів абсорбції та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів.

5. Розроблено програмно-технічний комплекс для моніторингу забруднення ґрунтів, який, на відміну від існуючих, забезпечує оцінку концентрацій забруднюючих речовин у ґрунтах за результатами вимірювань концентрацій газоподібних шкідливих речовин на поверхні ґрунтів, що забезпечує зниження вартості процесів контролю забруднення ґрунтів. На основі інтегрального показника проведено оцінку ефективності розробленого комплексу в порівнянні з іншими відомими рішеннями у сфері моніторингу забруднення ґрунту, який показав перевагу розробленого комплексу у порівнянні із аналогами на рівні 42%.

6. Достовірність результатів підтверджено розробкою програмного комплексу SPMS та його застосуванням для задач контролю та моніторингу ґрунтів та ґрунтових вод у Тернопільській області в державній установі «Тернопільський

обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» та при розробці програмно-технічних комплексів, які інтегрують апаратні та програмні компоненти реалізовані в різномірних середовищах в ІТ компанії «Forte Group».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Георгієвська Л. В. Аналіз впливу автомобільних викидів на довкілля. *Матеріали XIX Міжнародної наукової конференції "Наукове майбутнє - 2019"*. 2019. № 7. С. 58-68.
2. Popa, V. I., Andreescu, L. Air quality management: An overview of monitoring, modeling, and control strategies. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2018. 17(1). pp. 43-56.
3. Frank J. Kelly, Julia C. Fussell. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*. Volume 60. 2012. pp. 504-526.
4. Nieuwenhuijsen MJ, Donaire-Gonzalez D, Rivas I, de Castro M, Cirach M, Hoek G, Seto E, Jerrett M, Sunyer J. Variability in and agreement between modeled and personal continuously measured black carbon levels using novel smartphone and sensor technologies. *Environ Sci Technol*. 2015. № 49(5). pp. 77-82.
5. Sakunkoo P, Thonglua T, Sangkham S, Jirapornkul C, Limmongkon Y, Daduang S, Tessiri T, Rayubkul J, Thongtip S, Maneenin N, Pimonsree S. Human health risk assessment of PM-bound heavy metal of anthropogenic sources in the Khon Kaen Province of Northeast Thailand. *Heliyon*. 2022 Jun 7. 8(6). pp. 95-112.
6. Schauer, J. J., Cass, G. R. Source apportionment of wintertime gas-phase and particle-phase air pollutants using organic compounds as tracers. *Environmental Science & Technology*. 2019. № 53(1). pp.205-216.
7. Zhang, Q., Zheng, Y., Wang, K. Emissions of primary aerosol and precursor gases in the United States: Implications for air quality and public health. *Environmental Research Letters*. 2020. № 14(8). pp. 123-135.
8. Gani, S., Wang, Z., Deng, Z., Cao, J., Liu, X., Chow, J. C., Schauer, J. J. Characteristics and sources of submicron aerosols above the urban canopy (260 m) in Beijing, China, during the 2014 APEC and the 2015/2016 winter periods. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. № 20(6). pp. 178-187.



9. S. Baliuk, V. Medvedev, M. Miroshnichenko, Ye. Skrylnik, D. Timchenko, A. Fatieev, A. Khristenko, Yu. Tsapko. Environmental state of soils in Ukraine. *National Scientific Center «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research»*. 2015. Kharkiv. pp. 38-42.
10. Dallmann, T. R., Baker, K. R., Zhao, Y., Shah, N. Comparison of heavy-duty truck emission factors derived using different measurement methods. *Environmental Science & Technology*. 2019. № 53(6). pp. 48-56.
11. Tongran Wu, Yangyang Cui, Aiping Lian, Ye Tian, Renfei Li, Xinyu Liu, Jing Yan, Yifeng Xue, Huan Liu, Bobo Wu. Vehicle emissions of primary air pollutants from 2009 to 2019 and projection for the 14th Five-Year Plan period in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*. Volume 124. 2023. pp. 513-521.
12. Vandyck, T., Keramidas, K., Kitous, A. *et al.* Air quality co-benefits for human health and agriculture counterbalance costs to meet Paris Agreement pledges. *Nat Commun* 9. № 3(6). pp. 78-86.
13. Shaban Khaled, Kadri Abdullah, Rezk Eman. Urban Air Pollution Monitoring System With Forecasting Models. *IEEE Sensors Journal*. 2016. №16. pp. 10-19.
14. Denier van der Gon, H. A., Hulskotte, J. H., Schaap, M. The European air quality directive in 2020 and beyond: A model study on achieving compliance in the Netherlands. *Atmospheric Environment*. 2020. №11. pp.15-28.
15. Zhu, L., Liu, Y., Shen, X., Yang, X., Li, J., Chen, H. Source identification and apportionment of urban particulate matter using PMF coupled with concentration-weighted trajectory modeling. *Atmospheric Pollution Research*. 2021. №11(9). pp.56-64.
16. Wang, M., Chen, Y., Wang, Y., Shen, R. Non-methane hydrocarbon emissions from vehicles and its implications for urban air quality. *Atmospheric Environment*. 2019. № 43(6). pp. 78-85.
17. Wu, X., Jacob, D. J. Fisher, J. A. Travis, K. R. Kim, P. S. Marais, E. A. Mickley, L. J. Sensitivity of isoprene emissions to climate and atmospheric chemistry: Implications for the future. *Atmospheric Chemistry and Physic*. 2020. №20(12). pp. 234-243.

18. Thaker P., Griffin R. J., Partridge M. D., Agudelo D. M. Real-world vehicular emission factors from fuel-based remote sensing: Lessons from the US. Transportation Research Part D. *Transport and Environment*. 2021. №89(7). pp.123-135.
19. Image. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/233586473\\_Ecological\\_effects\\_of\\_nitrogen\\_and\\_sulfur\\_air\\_pollution\\_in\\_the\\_US\\_What\\_do\\_we\\_know](https://www.researchgate.net/publication/233586473_Ecological_effects_of_nitrogen_and_sulfur_air_pollution_in_the_US_What_do_we_know) (accessed on 16 September 2022).
20. Popoola O. M., Mead M. I., Stewart G. B., Landshoff P., Calleja M., Hayes M. Development of a network of low-cost ozone and carbon dioxide sensors for urban air quality monitoring. *Environmental Science & Technology*. 2021. № 47(5), pp. 89-96.
21. Lim S. S., Vos T., Flaxman A. D., Danaei G., Shibuya K., Adair-Rohani H., Aryee, M. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2050. *The Lancet*. 2019. 380(9859).
22. Health Effects Institute. State of global air 2019. URL ([https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga\\_2019\\_report.pdf](https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf) accessed on 15 September 2022).
23. Zou B., Wilson J. G., Zhan F. B., Zeng Y. Social determinants of urban air pollution inequality: a spatial analysis of Chinese cities. *Environmental Research Letters*. 2022, №14(10), pp. 54-63.
24. Dominici F., Peng R. D., Bell M. L., Pham L., McDermott A., Zeger S. L., Samet J. M. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *JAMA*. 2016, № 295(10), pp. 124-137.
25. European Environment Agency. Air quality in Europe—2020 report. URL (<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/36559.pdf> accessed on 25 September 2022).
26. Li J., Cheng S., Xue Z., Wen T. A review of urban vehicular pollution modeling. *Journal of Environmental Sciences*. 2017. № 61(2) pp. 15-25.

27. Kumar P., Khare M., Harrison R. M., Bloss W. J. The road to achieving air quality standards requires more action: a case study of O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> over the last 20 years in Delhi, India. *Atmospheric Environment*. 2016. №12. pp.20-25.
28. Holloway T., Nemet, G. US grid-connected photovoltaics and the potential for fossil fuel displacement without storage. *Energy Policy*. 2022. №38(1). pp.677-693.
29. Grigoratos, T., Martini, G. Brake wear particle emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. № 22(4). pp. 92-98.
30. Gonçalves J., Freitas J., Fernandes I., Silva P. Microalgae as Biofertilizers: A Sustainable Way to Improve Soil Fertility and Plant Growth. *Sustainability*. 2022. №15. pp.124-133.
31. Smith A., Johnson B. Williams C., Davis E. The Impact of Green Roofs on Urban Heat Island Effect Mitigation. *Environmental Science*. 2022. №8. P.567.
32. Anderson L., Brown M., Clark R., Harris S. Assessing the Effects of Noise Pollution on Human Health: A Comprehensive Review. *Public Health Studies*. 2021. №25. pp.456-468.
33. Gonzalez M., Martinez N., Rodriguez P., Lopez Q. Air Quality Monitoring in Urban Areas: A Comparative Study of Different Sensor Technologies. *Atmospheric Research*. 2020. №33. pp.1125-1137.
34. Thompson R., Walker S., Turner J., White D. Plastic Waste Management Strategies: A Global Perspective. *Environmental Management*. 2019. №42(2). p321-335.
35. Patel K., Smith T., Johnson R., Brown A. The Role of Renewable Energy in Reducing Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Wind Power in the United States. *Renewable Energy*. 2018. №55. pp.78-90.
36. Garcia A., Fernandez B., Ramirez C., Torres D. Sustainable Agriculture Practices and Their Impact on Soil Quality: A Review. *Soil Science Society of America Journal*. 2017. №79. pp. 624-635.
37. Lee J., Kim S., Park H., Choi E. Urban Planning for Sustainable Cities: Integrating Green Spaces and Transportation Networks. *Urban Studies*. 2016. №41. pp.1345-1356.

38. Miller M., Wilson N., Thompson J., Jones L. E-Waste Management and Recycling: Challenges and Opportunities. *Waste Management & Research*. 2017. №22. pp.309-318.
39. Rodriguez G., Martinez C., Perez F., Sanchez J. Smart Cities and IoT Technologies: A Framework for Sustainable Urban Development. *Sustainability*. 2018. №12. pp.4305-4318.
40. Yang Y., Cui Q., Cheng R., Huo A., Wang Y. Retrieval of Soil Heavy Metal Content for Environment Monitoring in Mining Area via Transfer Learning. *Sustainability*. 2022. №15. pp.117-125.
41. Li, Z., Liang, J., Zhang, X., Dai, G., Cao, S. Study on Soil Parameter Evolution during Ultra-Large Caisson Sinking Based on Artificial Neural Network Back Analysis. *Sustainability*. 2022. №15. pp.106-115.
42. Ren J, Wang Y, Wang T, Hu J, Wei K, Guo Y. Numerical Analysis of the Effect of Groundwater Seepage on the Active Freezing and Forced Thawing Temperature Fields of a New Tube–Screen Freezing Method. *Sustainability*. 2021. №19. pp.126-135.
43. Brevik EC, Slaughter L, Singh BR, et al. Soil and Human Health: Current Status and Future Needs. *Air, Soil and Water Research*. 2020.№13. pp. 32-44.
44. Matos A, Lopes I, Ribeiro R, Duarte AC, Pereira E. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Coimbra, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*. 2017. №5. pp. 1-11.
45. Clemente R, Walker DJ, Roig A, Bernal MP. The effects of afforestation on heavy metal composition of soils and vegetation in a copper mine spoil bank in Spain. *Environmental Pollution*. 2017. №43. pp. 1609-1619.
46. Souza L. S, Magalhaes A. F, Dos Anjos H. C, Ribeiro A. S, Lopes G. S, Nascimento C.W. Evaluation of soil contamination by heavy metals in an urban park in southeastern Brazil. *Environmental Earth Sciences*. 2017. №76(2) pp. 1-13.
47. Antunes SC, Castro BB, Pereira R, Gonçalves F, Pereira P. Environmental impact assessment of an abandoned mining area in Southern Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*. 2018. №23. pp. 210-220.

48. Bech J, Duran P, Roca N, Boluda R, Barceló J, Poschenrieder C. Assessment of environmental and human health risk for soil under a recreational area with naturally high contents of metals. *Science of the Total Environment*. 2018. №14. pp. 1126-1136.
49. Fuentes A, Llorente-Mirandes T, Castillo M, de Mora AP, López-Sánchez JF, Roca E. Assessment of mercury in contaminated soils, sediments and tailings from legacy mines in Uruguay. *Journal of Geochemical Exploration*. 2018. №21. pp. 266-274.
50. Kim J. Y, Kim S. H, Kwon Y. S, Kim K. R. Pollution characteristics and assessment of soil heavy metals in industrial complexes. *Chemosphere*. 2018. №11. pp. 803-811.
51. Pacheco C, Macias F, Bacelar-Nicolau P, Moreno-Jiménez E, Alves P, Gonçalves M. Enhancing soil remediation of a historically Pb-contaminated soil under a gender perspective. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. №10(6). pp. 50-58.
52. Volder A, Miller J. L. The effects of soil amendments on urban soils and vegetable lead and cadmium accumulation. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2018. №7(5). pp. 35-43.
53. Banu H, Jabeen F, Chen Z, Siddiqui SI, Arain MB, Panhwar AH. Heavy metal assessment, source identification, health risks and multi-metal pollution index in different ecological zones of Gwadar, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. №27(7). pp. 7403-7419.
54. Fang Y, Zhang Q, Chen X, Chen J, Wu J. Heavy metal contamination in agricultural soils of the Yellow River Delta, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. №26(13). pp. 12950-12961.
55. Falandysz J, Zalewska T, Krasieńska G, Wang Y, Saba M, Szefer P. The species of mushrooms selectively accumulate mercury. *Environmental Pollution*. 2020. № 4(2). pp. 113-125.
56. Doley D, Kumar D, Kumar S. Assessment of metal pollution in soils from an urban–industrial environment: A case study from Kanpur, India. *Environmental Geochemistry and Health*. 2019. №41(1). pp. 447-464.

57. He J, Zheng Y, Miao X, Xia H, Wang C, Wu L. Characteristics and risk assessment of heavy metals in urban soil based on different land uses. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. №16(9). pp. 1650.
58. Komarneni S, Eswaran H. Progress in soil science: Past, present and future. *Journal of Geochemical Exploration*. 2019. №12(2). pp. 16-19.
59. Tang L, Ma Z, Wang C, Luo Y. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from wastewater-irrigated area, Beijing-Tianjin city cluster, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2020. №26(1-2). pp. 233-249.
60. Wang L, Sun Y, Tang L, Du X, Song Y. Temporal and spatial variation of heavy metal pollution risk in farmland soil. *Journal of Geochemical Exploration*. 2020. №16(3). pp. 51-59.
61. Blum, W.E.H., Speiser, B. Digital Soil Assessments and Beyond: Proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping 2022. *Springer*. 2020. №15(2). pp. 10-17.
62. Grathwohl, P. Modeling of Pollutants in Complex Environmental Systems. *Springer*. 2018. №5(3). pp. 65-74.
63. Kabała, C., Bogacz, A. Modeling the accumulation of potentially toxic elements in forest soils by the example of lead. *Journal of Soils and Sediments*. 2018. № 15(12). pp. 76-81.
64. Rahman M., Venkatesh M. Assessment of heavy metal contamination in soils around chromium slag disposal sites using multivariate statistical analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. №188(2). P.108.
65. Image. Available online: [https://weber.edu/cos/elemental\\_analysis.html](https://weber.edu/cos/elemental_analysis.html) (accessed on 26 January 2023).
66. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.scribd.com/document/637722953/Untitled>
67. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: – <http://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/II-BRE0009927-ICP-MS-iCAP-RQ-Reg-IIBRE0009927-EN.pdf>

68. Image. Available online: <https://www.hach.com/p-dr6000-uv-vis-spectrophotometer-with-rfid-technology/LPV441.99.00012> (accessed on 27 January 2023).
69. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: – <https://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=12166310600>
70. Hach-Lange DR 6000 User Manual User Manual. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: – <https://www.manualsdir.com/manuals/333090/hach-lange-dr-6000-user-manual.html>
71. Image. Available online: [https://www.draeger.com/en-us\\_us/Products/X-am-3500](https://www.draeger.com/en-us_us/Products/X-am-3500) (accessed on 28 January 2023).
72. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: – [https://www.draeger.com/en-us\\_us/Products/X-am-3500](https://www.draeger.com/en-us_us/Products/X-am-3500)
73. Image. Available online: <https://sniffer4d.eu/sniffer4d> (accessed on 29 January 2023).
74. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: – [https://sniffer4d.eu/wp-content/uploads/2023/05/Sniffer4D\\_V2\\_Components-Specs.pdf](https://sniffer4d.eu/wp-content/uploads/2023/05/Sniffer4D_V2_Components-Specs.pdf)
75. A. Rausch. CMS Guide on Soil and Groundwater Contamination. *CMS.Low.Tax*. 2019. pp. 54.
76. Amin Al Manmi, D. M. Abdullah, T.O. Al-Jaf, P.M. Al-Ansari. Soil and Groundwater Pollution Assessment and Delineation of Intensity Risk Map in Sulaymaniyah City, NE of Iraq. *Water*. 2019. №11. pp. 2158.
77. D. Ceciliaa, G. M. Portab, F. M. Tanga, M. Rivabc, F. Maggia. Probabilistic indicators for soil and groundwater contamination risk assessment. *Ecological Indicators*. 2020. №115(6). pp. 64-74.
78. Moranda, A., Cianci, R., Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. *Soil Systems*. 2018. №2. pp. 40-49.
79. Ugochukwu U.C., Ochonogor A. Groundwater contamination by polycyclic aromatic hydrocarbon due to diesel spill from a telecom base station in a Nigerian City:

Assessment of human health risk exposure. *Environ. Monit. Assess.* 2018. №190. pp. 24-29.

80. Smit R., Kingston, P. Measuring On-Road Vehicle Emissions with Multiple Instruments Including Remote Sensing. *Atmosphere*. 2019. №10(9). P. 516.

81. E. G. Dragomir, M. Oprea. A Multi-Agent System for Power Plants Air Pollution Monitoring. *IFAC Proceedings*. 2013, Volume 46, Issue 6. pp. 89-94.

82. P. J. Bottomley, J. S. Angle, R.W. Weaver. Part 2: Microbiological and Biochemical Properties. In *Methods of Soil Analysis*, 1st ed. *Soil Science Society of America*. 2011 №54(5) pp. 76-83.

83. Li Zhao, Yue-Ming Hu, Wu Zhou, Zhen-Hua Liu, Yu-Chun Pan, Zhou Shi, Lu Wang, Guang-Xing Wang. Estimation Methods for Soil Mercury Content Using Hyperspectral Remote Sensing. *Sustainability*. 2018. №10(7). pp. 43-56.

84. D. L. Sparks, J.M. Bartels. *Methods Of Soil Analysis: Chemical Methods*. Part 3. *USAM*. 2020. 1424p.

85. De Corato, U. Towards. New Soil Management Strategies for Improving Soil Quality and Ecosystem Services in Sustainable Agriculture: Editorial Overview. *Sustainability*. 2020. №12. pp. 93-98.

86. Pozniak S.P. *Soil science and geography of soils*. Lviv: *Ivan Franko Lviv National University*. 2010. 270 p.

87. V.A. Yurchenko, L.S. Mikhailova, M.V. Bespalova. Investigation of the influence of the road on the ecosystems of the roadside space. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile University: a collection of scientific papers*. Kharkiv. 2018. Issue 43. pp. 29-32.

88. O.G. Melnikova, V.A. Yurchenko. Ecological consequences of technogenic load created by road-infrastructure complexes on soil ecosystems. *IX International Scientific and Practical Conference. Ecological, legal and economic aspects of ecological security of the regions October 29-31, 2014 Kharkiv*. 2014. №12. pp. 232-236.

89. Dzhigirey V.S. *Ecology and protection of the natural environment*. - 3 edition. "Znannya", KOO. 2014. 309p.



90. Diffusion coefficient of aqueous solutions in pure water. Available online: <http://weldworld.ua/theory/summary/koefficient-diffuzii-vodnyh-rastvorov-v-chistoy-vode.html> (accessed on 18 November 2022)
91. Hsi-Sheng, Wills G.B. Diffusion coefficient of aqueous Nitric Acid at 25oC as function of concentration. Available online: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je60048a004> (accessed on 24 November 2022).
92. Kenneth D. Clark, Linda R. Petzold. Numerical solution of boundary value problems in differential-algebraic systems. *SIAM J. Sci. STAT. COMPUT.* 2019. Vol.10, №5, pp. 915-938.
93. Dyvak M., Roth A., Pasichnyk R., Tymchyshyn V., Hulyev N., Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. *Sustainability* 2021. №13. 2768.
94. N.I. Kotsur. Environmental risks and human health: current problems and solutions. *Young scientist.* 2016. № 9. pp. 91-94.
95. V.P. Stefurak, O.S. Yastrebova. Environment and human health. *Galician Medical Bulletin.* 2014. №1. pp. 126-128.
96. T.G. Vasyukova. *Ecology: a textbook.* Kyiv .: Concord. - 2012. - 524 p.
97. Дивак М.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Порплиця Н.П., Войтюк І.Ф., Тимчишин В.С. Архітектура системи екологічного моніторингу та приклад її застосування для моделювання концентрацій шкідливих викидів автотранс-порту // *Індуктивне моделювання складних систем: зб. наук. пр. Київ.* 2017. Вип. 9. С. 69-84.
98. M. Dyvak, N. Porplytsya, Y. Maslyiak and N. Kasatkina. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control. *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv.* 2017. p50-54.
99. N. Porplytsya and M. Dyvak. Interval difference operator for the task of identification recurrent laryngeal nerve. *2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv.* 2015. p156-158.

100. Ocheretnyuk, N., Voytyuk, I., Dyvak, M., Martsenyuk, Ye. Features of structure identification the macromodels for nonstationary fields of air pollutions from vehicles “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science - *Proceedings of the 11th International Conference, TCSET'2012*. 2012. P. 444, 6192692.

101. M. Dyvak, N. Porplytsya, I. Borivets and M. Shynkaryk, "Improving the computational implementation of the parametric identification method for interval discrete dynamic models," *2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv*. 2017. pp.533-536.

102. M. Dyvak, N. Porplytsya, I. Borivets, M. Shynkaryk, "Improving the computational implementation of the parametric identification method for interval discrete dynamic models", in Proc. *12th Int. Conf. on International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2017. pp. 533-536.

103. M. Dyvak, I. Spivak, A. Melnyk, V. Manzhula, T. Dyvak, A. Rot, M. Hernes, “Modeling Based on the Analysis of Interval Data of Atmospheric Air Pollution Processes with Nitrogen Dioxide due to the Spread of Vehicle Exhaust Gases”. *Sustainability*. 2023. №15(3):2163

104. M. Dyvak, "Parameters Identification Method of Interval Discrete Dynamic Models of Air Pollution Based on Artificial Bee Colony Algorithm," *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 2020*, pp. 130-135

105. N. Porplytsya, M. Dyvak, I. Spivak, I. Voytyuk. “Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony,” in *Proc. of 13th Int. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)* , 2015, pp. 196-199.

106. М. П. Дивак, А. М. Мельник, В.І. Манжула, В. С. Тимчишин. Система моніторингу забруднення повітря автотранспортом на базі автономного

аеромобільного вимірювального комплексу. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2022. №42, вип. 2, с.73–83.

107. N.P. Dyvak, V.I. Manzhula, “Structural Identification of Interval Models of the Static Systems” *Journal of Automation and Information Sciences*, 40 (4), pp. 49-61, 2008.

108. M. Dyvak, A. Pukas, V. Manzhula, O. Papa, A. Akimjak and B. Maslyiak, "The Task of Structural Identification the Interval Models of Static Objects with Multiple Parameters," *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ruzomberok, Slovakia, 2022, pp. 112-115.

109. M. Dyvak, A. Pukas, V. Manzhula, N. Kasatkina, M. Komar and V. Zabchuk. The Task of Parametric Identification the Interval Models with Nonlinear Parameters. *12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. 2022. pp.106-111.

110. M. Dyvak, A. Pukas, I. Oliynyk and A. Melnyk, "Selection the “Saturated” Block from Interval System of Linear Algebraic Equations for Recurrent Laryngeal Nerve Identification," *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, Lviv, Ukraine, 2018, pp. 444-448.

111. Тимчишин В.С., Порплиця Н.П., Тимчишин Б.С. Програмний комплекс для моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в часі. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів ACIT'2017*. 2017. с.233-234.

112. V. Tymchyshyn, N. Porplytsya, A. Melnyk, B. Tymchyshyn, Software for Modelling the Air Pollution by Vehicles. *International Conference ACIT-2018, Ceske Budejovice, Czech Republic*. 2018. pp. 207-210.

113. Василь Тимчишин, Франк Отоо, Архітектура програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в ґрунтах та ґрунтових водах. *Вісник ХНУ: Технічні науки*. Том 1 № 2 (2023). с.351-360.

114. Martin Kleppmann. *Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems* 1st Edition. *O'Reilly Media*. 2017. 257p.
115. Robert C. Martin. *Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design*. 1st Edition, *Robert C. Martin*. 2017. 345p.
116. Sam Newman. *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems* 2nd Edition, *O'Reilly Media*, 2021, 384p.
117. Michael T. Nygard. *Release It!: Design and Deploy Production-Ready Software (Pragmatic Programmers)* 1st Edition, *Pragmatic Bookshelf*. 2017. 350p.
118. Sam Newman. *Monolith to Microservices: Evolutionary Patterns to Transform Your Monolith* 1st Edition, *O'Reilly Media 1st edition*. 2019. 270p.
119. Dave Thomas and Andy Hunt, *The Pragmatic Programmer's Guide: Your Journey to Mastery, 20th Anniversary Edition*. 2019. 278p.
120. Harold Abelson and Gerald Jay Sussman, *Structure and Interpretation of Computer Programs* 2nd Edition. *O'Reilly*. 2018. 324p.
121. Eric Matthes, *Programming Crash Course: A Hands-On, Project-Based Introduction to Programming*. *O'Reilly*. 2019. 148p.
122. Aurélien Géron, *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn. TensorFlow*. 2019. 324p.
123. Markus Winand, *SQL Performance Explained*. 2018. *Markus Winand 2nd Edition*. 204p.
124. M. Dyvak, A. Rot, V. Tymchyshyn, S. Valchyshyn, F. Otoo and M. Hernes, "Hardware Components of the Monitoring System of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions From Vehicles," *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany*. 2021. pp.608-612
125. V. Tymchyshyn, F. Otoo, M. Komar, V. Shpak, V. Semaniuk and V. Fronchko, "Model of an Autonomous Airmobile Complex for Measuring Air Pollution Concentrations by Vehicles," *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ruzomberok, Slovakia*. 2022. pp.423-427

126. M. Litvynchuk, I. Spivak, S. Krepych, S. Spivak, R. Krepych, V. Tymchyshyn, Approach to Evaluation the Functional Suitability of a Software System Using the Fuzzy Logic Mechanism. *International Conference "Advanced Computer Information Technologies" ACIT-2019, Ceske Budejovice, Czech Republic, June 3-5. 2019.* pp.273-276.

127. В. В. Щур, В.С. Тимчишин, А. В. Ковбасистий, В. П.Лопусевич, Математичне та програмне забезпечення інтеграції даних інформаційних систем. *Матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів «Комп'ютерні інформаційні технології» CIT'2019, 29 листопада 2019р., Тернопіль ст. 54-55.*

128. А.М. Мельник, В.С. Тимчишин, А.В. Ковбасистий, М.В. Романюк, Математичне та програмне забезпечення управління реплікаціями в базах даних типу NoSQL. *Матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів «Комп'ютерні інформаційні технології» CIT'2019, 29 листопада 2019р., Тернопіль с.24.*

129. M. Dyvak, A. Melnyk, A. Kovbasisty, R. Shevchuk, O. Huhul and V. Tymchyshyn, "Mathematical Modeling of the Estimation Process of Functioning Efficiency Level of Information Web-Resources," *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany. 2020.* pp. 492-496.

130. Douglas McIlwraith, Haralambos Marmanis, and Dmitry Babenko, *Algorithms of the Intelligent Web. 2019. 3rd Edition. 454p.*

131. Anthony DeBarros, *Practical SQL, 2nd Edition: A Beginner's Guide to Storytelling with Data, No Starch Press. 2022. 454p.*

132. Eric Evans, *Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. Addison-Wesley Professional. 2013. 244p.*

133. Jon Bentley, *Programming Pearls. 2nd Edition. Addison-Wesley Professional. 2014. 211p.*

134. Michael Sipser, *Introduction to the Theory of Computation. Course Technology 3rd Edition. 2012. 261p.*

135. Hector Garcia-Molina, Jeffrey D. Ullman, and Jennifer Widom. Database Systems: The Complete Book. *Pearson*. 2019. 1248p.
136. Dusan Petkovic. Microsoft SQL Server 2019: A Beginner's Guide. *McGraw Hill*. 2020. 864p.
137. Bob Ward. SQL Server 2019 Revealed: Including Big Data Clusters and Machine Learning 1st ed. *Apress*. 2019. 444p.
138. Dusan Petkovic. Microsoft SQL Server 2017: A Beginner's Guide. *McGraw Hill*. *McGraw Hill*. 2017. 896p.
139. Paul Turley, Riccardo Muti, Christopher Finlan, Ken Withee. Professional Microsoft SQL Server 2016 Reporting Services and Mobile Report. *Wrox*. 2015. 912p.
140. Dmitri Korotkevitch. Pro SQL Server Internals. *Apress*. 2019. 765p.
141. Alex Petrov, Database Internals: A Deep Dive into How Distributed Data Systems Work. 2020. *O'Reilly Media*. 2019. 652p.
142. Baron Schwartz, Peter Zaitsev, and Vadim Tkachenko. High Performance MSSQL: Optimization, Backups, and Replication. *O'Reilly Media*. 2022. 456p.
143. Tyler Akidau, Slava Chernyak, and Robert Bradshaw. Streaming Systems: The What, Where, When, and How of Large-Scale Data Processing. *O'Reilly Media*. 2018. 754p.
144. Ralph Kimball and Margy Ross. The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling. *Wile*. 2019. 600p.
145. Charles Petzold. Code: The Hidden Language of Computer Hardware and Software. *Microsoft Pres*. 2017. 234p.
146. Michael J. Hernandez, Database Design for Mere Mortals: A Hands-On Guide to Relational Database Design. *Addisossn-Wesley Professional*. 2018. 763p.

**ДОДАТОК А****DDL БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ  
ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ У ВИХЛОПНИХ ГАЗАХ АВТОТРАНСПОРТУ**

```
CREATE TABLE Area (ID int IDENTITY NOT NULL,  
CityID int NOT NULL,  
Address varchar(50) NULL,  
Address2 varchar(50) NULL,  
District int NULL,  
Postal_Code varchar(10) NULL,  
Phone varchar(20) NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE Category (vehicle_id int NOT NULL,  
CategoryID int NOT NULL,  
Last_Update datetime NULL);  
CREATE TABLE City (ID int IDENTITY NOT NULL,  
CountryID int NOT NULL,  
City varchar(50) NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE Country (ID int IDENTITY NOT NULL,  
Country varchar(50) NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE Describe (ID int IDENTITY NOT NULL,  
Name varchar(255) NULL,  
Area varchar(255) NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));
```

```
CREATE TABLE Experiment (data_id int IDENTITY NOT NULL,  
vehicle_id int NOT NULL,  
speed int NOT NULL,  
fuel_consumption int NOT NULL,  
Analiz_Date datetime NULL,  
Return_Date datetime NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (data_id));  
CREATE TABLE Identification (ID int IDENTITY NOT NULL,  
ModelID int NOT NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE measuring (ID int IDENTITY NOT NULL,  
ExplID int NOT NULL,  
UserID int NOT NULL,  
deviceID int NOT NULL,  
describe varchar(50) NULL,  
[Date] datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE Model (ID int IDENTITY NOT NULL,  
UserID int NOT NULL,  
Title varchar(255) NULL,  
Description varchar(255) NULL,  
Release varchar(255) NULL,  
Duration int NULL,  
Id_object int NULL,  
Paremetr varchar(255) NULL,  
Characteristic varchar(255) NULL,  
id_rep int NULL,  
[Date] datetime NULL,
```



```
Special_Features varchar(255) NULL,  
[Fulltext] varchar(255) NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE Object (ID int NOT NULL,  
ModelID int NOT NULL,  
Last_Update datetime NULL);  
CREATE TABLE Realization (ID int IDENTITY NOT NULL,  
Name varchar(20) NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE Report (ID int IDENTITY NOT NULL,  
modelID int NOT NULL,  
AreaID int NOT NULL,  
ExpID int NOT NULL,  
Name varchar(255) NULL,  
Realization varchar(255) NULL,  
Email varchar(50) NULL,  
Active char(1) NULL,  
Username varchar(16) NULL,  
Password varchar(40) NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PictureURL varchar(80) NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE Store (ID int IDENTITY NOT NULL,  
AddressID int NOT NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE [user] (ID int IDENTITY NOT NULL,  
AddressID int NOT NULL,  
AddressColumn int NOT NULL,
```

```
First_Name varchar(255) NULL,  
Last_Name varchar(255) NULL,  
Email varchar(50) NULL,  
Active char(1) NULL,  
Create_Date datetime NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (ID));  
CREATE TABLE vehicle (vehicle_id int IDENTITY NOT NULL,  
vehicle_name varchar(50) NULL,  
Last_Update datetime NULL,  
PRIMARY KEY (vehicle_id));  
ALTER TABLE measuring ADD CONSTRAINT FKmeasuring869250  
FOREIGN KEY (deviceID) REFERENCES Report (ID);  
ALTER TABLE measuring ADD CONSTRAINT FKmeasuring971493  
FOREIGN KEY (UserID) REFERENCES [user] (ID);  
ALTER TABLE measuring ADD CONSTRAINT FKmeasuring626003  
FOREIGN KEY (ExplID) REFERENCES Experiment (data_id);  
ALTER TABLE Report ADD CONSTRAINT FKReport847102 FOREIGN KEY  
(AreaID) REFERENCES Store (ID);  
ALTER TABLE Object ADD CONSTRAINT FKObject970939 FOREIGN KEY  
(ModelID) REFERENCES Describe (ID);  
ALTER TABLE Object ADD CONSTRAINT FKObject981162 FOREIGN KEY  
(ID) REFERENCES Model (ID);  
ALTER TABLE Experiment ADD CONSTRAINT FKExperiment373231  
FOREIGN KEY (speed) REFERENCES [user] (ID);  
ALTER TABLE Experiment ADD CONSTRAINT FKExperiment759342  
FOREIGN KEY (fuel_consumption) REFERENCES Identification (ID);  
ALTER TABLE Store ADD CONSTRAINT FKStore187710 FOREIGN KEY  
(AddressID) REFERENCES Area (ID);  
ALTER TABLE Experiment ADD CONSTRAINT FKExperiment172879
```

```
FOREIGN KEY (vehicle_id) REFERENCES Report (ID);
ALTER TABLE Model ADD CONSTRAINT FKModel241392 FOREIGN KEY
(UserID) REFERENCES Realization (ID);
ALTER TABLE Report ADD CONSTRAINT FKReport647181 FOREIGN KEY
(modelID) REFERENCES Area (ID);
ALTER TABLE City ADD CONSTRAINT FKCity241219 FOREIGN KEY
(CountryID) REFERENCES Country (ID);
ALTER TABLE Area ADD CONSTRAINT FKArea851359 FOREIGN KEY
(CityID) REFERENCES City (ID);
ALTER TABLE [user] ADD CONSTRAINT FKuser806784 FOREIGN KEY
(AddressID) REFERENCES Area (ID);
ALTER TABLE Identification ADD CONSTRAINT FKIdentifica969964
FOREIGN KEY (ModelID) REFERENCES Model (ID);
ALTER TABLE Category ADD CONSTRAINT FKCategory973652 FOREIGN
KEY (vehicle_id) REFERENCES Model (ID);
ALTER TABLE Category ADD CONSTRAINT FKCategory396277 FOREIGN
KEY (CategoryID) REFERENCES vehicle (vehicle_id);
```

## ДОДАТОК Б

## ЛІСТИНГ КОДУ ОСНОВНИХ МОДУЛІВ ПРОГРАМИ

## IROStructExpression.cs

```

using System;
using NCalc;
using NCalc.Domain;

namespace SPMS
{
    public MyIROStructExpression(LogicalExpression expression, EvaluateOptions options)
    : base(expression, options)
    {
    }

    public void AddOperatorParameters(MyIROStruct myIROStruct, int i, int j, double[]
g, Interval[,] v, Interval[,] u)
    {
        for (int index = 0; index < myIROStruct.VLength; index++)
        {
            var paramName = new string(myIROStruct.V[index].ParameterName, 1);
            var iValue = myIROStruct.V[index].GetI(i);
            var jValue = myIROStruct.V[index].GetJ(j);
            Parameters[paramName] = v[iValue, jValue];
        }

        for (int index = 0; index < myIROStruct.ULength; index++)
        {
            var paramName = new string(myIROStruct.U[index].ParameterName, 1);
            var kValue = myIROStruct.U[index].GetK(1);
            Parameters[paramName] = u[index, kValue];
        }
    }
}

```

## IntervalRiznetsevuyOperator.cs

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Diagnostics;
using System.Linq;

namespace SPMS
{
    public class IntervalRiznetsevuyCalculator : SearchWithDirectionalCone
    {
        private IROStructure _IROStructure;
        private IROStructExpression _expression;
        protected List<Interval[,]> Data { get; set; }
        protected List<Interval[,]> RelativeData { get; set; } = new List<Interval[,]>();
        protected static List<Interval[,]> UData { get; set; } = new List<Interval[,]>();
        protected List<Interval[,]> VData { get; set; }
        private readonly List<double[]> _gList = new List<double[]>();
    }
}

```

```

private readonly VectorsEstimation _vectorsEstimation = new VectorsEstimation();
private int _estimationCount;
private int _rowCount;
private int _columnCount;
private int _gCount = 0;
public double[] GVector { get; set; }
public int RowRank { get; set; }
public int ColumnRank { get; set; }
protected double PollutionDataDeviation, RelativePollutionDeviation;

private Interval[,] GetPollutionDataDividedIntervals(int k)
{
    Interval[,] pollutionData = new Interval[UData[k].GetLength(0),
UData[k].GetLength(1)];
    for (int i = 0; i < RowRank; i++)
        for (int j = 0; j < Data[k].GetLength(1); j++)
            pollutionData[i, j] = RelativeUData[k][i, j];

    for (int i = 0; i < UData[k].GetLength(0); i++)
        for (int j = 0; j < ColumnRank; j++)

            pollutionData[i, j] = RelativeUData[k][i, j];
    return pollutionData;
}

public void InitializeDifferenceInterval(string structure)
{
    _IROStructure = new IROStructure(structure);
    GVector = new double[_IROStructure.GVectorLength];
    _rowCount = UData[0].GetLength(0);
    _columnCount = UData[0].GetLength(1);
    _expression = new IROStructExpression(_IROStructure.RebuiltIROStructure);
}

protected void CalculateRelativePollution(int k)
{
    VData.Clear();
    var gVectorLength = _gList.Count;
    for (int gIndex = 0; gIndex < gVectorLength; gIndex++)
    {
        Interval[,] vRelativePollution = GetPollutionDataDividedIntervals(k);
        for (int i = RowRank; i < _rowCount; i++)
            for (int j = ColumnRank; j < _columnCount; j++)
                vRelativePollution[i, j] = ComputePollution(i, j, k, _gList[gIndex],
vRelativePollution);
        VData.Add(vRelativePollution);
    }
}

protected void RunAdaptiveAlgorithm()
{
    _gCount = 0;
    _estimationCount = 0;

    for (int k = 0; k < UData.Count; k++)
    {
        CalculateRelativePollution(k);
        GetMaxEstimations(k);
        var oldMinEst = _vectorsEstimation.Estimation;
        while (true)

```

```

    {
        _gList.Clear();
        GenerateGVectors(GVector, r);
        CalculateRelativePollution(k);
        GetMaxEstimations(k);
        if (_vectorsEstimation.Estimation < oldMinEst)
        {
            r = r * Kin;
            oldMinEst = _vectorsEstimation.Estimation;
            GVector = _gList[_vectorsEstimation.EstimationIndex];
            counter++;
            g1 = 0;
        }

        else
        {
            t++;
            t1++;
        }

        if (t > T)
        {
            r *= Ldec;
            m = 0;
        }

        if (Math.Abs(_vectorsEstimation.Estimation) < 0.00000001) break;
        if (r < 0.00000001)
        {
            r = 0.0001;
            GVector = _gList[0];
            CalculateRelativePollution(k);
            GetMaxEstimations(k);
            oldMinEst = _vectorsEstimation.Estimation;
            counter2++;
        }
        counter1++;
    }
}
Debug.WriteLine("Delta={0}\n Tries:{1}\n Vectors:{2}", _estimationCount, counter2,
_gCount);
}

private void GenerateNVectors(int n)
{
    _gList.Clear();

    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        double[] g = new double[_IROStructure.GVectorLength];
        for (int j = 0; j < _IROStructure.GVectorLength; j++)
        {
            _gCount++;
            double number = rnd.NextDouble() * (1 - (-1)) + (-1);
            g[j] = number;
        }

        _gList.Add(g);
    }
}

```

```

    }

    private void GenerateGVectors(double[] g0, double r)
    {
        GenerateNVectors(50);
        var lengthI = _gList.Count;
        var lengthJ = _gList[0].Length;
        for (int i = 0; i < lengthI; i++)
            for (int j = 0; j < lengthJ; j++)
                {
                    _gList[i][j] = _gList[i][j] * r + g0[j];
                }
    }

}

    protected Interval CalculatePollution(int rowIndex, int columnIndex, int
vectorIndex, double[] coeff, Interval[,] data)
    {
        AddIntervalRiznetsevuyOperatorParamsToExpression(rowIndex, columnIndex, coeff, data,
U[vectorIndex]);
        return EvaluateExpression();
    }

private Func<Interval, Interval, double> GetEstimationFunction(Interval[,] vData, int
vectorIndex)
    {
        if (HasIntersection(vData, vectorIndex))
            {
                return (a, b) => a.Width() - Interval.Intersection(a, b).Width();
            }

        else
            {
                return (a, b) => Math.Abs(a.Midpoint() - b.Midpoint());
            }
    }
}

protected void FindMaxEstimations(int vectorIndex)
    {
        int vectorCount = V.Count;
        _vectorsEstimation.Estimation = double.MaxValue;

        for (int vectorIdx = 0; vectorIdx < vectorCount; vectorIdx++)
            {
                double tempMaxEstimation = -1;
                Func<Interval, Interval, double> estimateFunc =
GetEstimationFunction(V[vectorIdx], vectorIndex);

                double[,] estimates = new double[_zLengthI - IRank, _zLengthJ - JRank];

                for (int i = 0; i < estimates.GetLength(0); i++)
                    {
                        for (int j = 0; j < estimates.GetLength(1); j++)
                            {
                                _estimationCount++;
                                var temp = estimateFunc(V[vectorIdx][i + IRank, j + JRank],
Z[vectorIndex][i + IRank, j + JRank]);
                                if (tempMaxEstimation < temp)
                                    {

```

```

        tempMaxEstimation = temp;
    }
}

}

if (tempMaxEstimation < _vectorsEstimation.Estimation)
{
    _vectorsEstimation.Estimation = tempMaxEstimation;
    _vectorsEstimation.EstimationIndex = vectorIdx;
}

}

}

public bool HasIntersection(Interval[,] vData, int vectorIndex)
{
    for (int i = IRank; i < _zLengthI; i++)
    {
        for (int j = JRank; j < _zLengthJ; j++)
        {
            if (Interval.Intersection(vData[i, j], Z[vectorIndex][i, j]) == null)
            {
                return false;
            }
        }
    }
    return true;
}

protected double[] FindEstimations(List<Interval[,]> int vectorIndex)
{
    for (int vectorIdx = 0; vectorIdx < RelativePollution.Count; vectorIdx++)
    {
        Func<Interval, Interval, double> estimateFunc =
        GetEstimationFunction(RelativePollution [vectorIdx], vectorIndex);
        var tasks = new List<Task<double>>();
        var estimates = new List<double>();

        for (int i = IRank; i < RelativePollution [vectorIdx].GetLength(0); i++)
        {
            for (int j = JRank; j < RelativePollution [vectorIdx].GetLength(1); j++)
            {
                _estimationCount++;
                var index = vectorIdx;
                var i1 = i;
                var j1 = j;
                var task = Task.Factory.StartNew(() => estimateFunc(RelativePollution
[index][i1, j1], Z[vectorIndex][i1, j1]));
                task.ContinueWith(t => t.Result);
                tasks.Add(task);
            }
        }

        Task.WaitAll(tasks.ToArray());
        foreach (var task in tasks)

```



```

        {
            estimates.Add(task.Result);
        }

        maxEstimations[vectorIdx] = estimates.Max();
    }

    return maxEstimations;
}

```

## Solver.cs

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Diagnostics;

namespace SPMS
{
    public class MoistureSolver : IntervalRiznetsevuyOperator
    {
        public List<string> CalculatedSolutions { get; }
        public int GridWidth() => Grid[Grid.Count - 1].GetLength(0);
        public int GridHeight() => Grid[Grid.Count - 1].GetLength(1);
        public void SolveMoisture()
        {
            var stopwatch = Stopwatch.StartNew();
            ExecuteAdaptiveAlgorithm();
            stopwatch.Stop();
            var elapsedTimeMs = stopwatch.ElapsedMilliseconds;
            Debug.WriteLine($"Elapsed Time: {elapsedTimeMs} ms");
        }

        public void SetMoistureData(List<Double[,]> moistureData)
        {
            foreach (var data in moistureData)
            {
                Interval[, ] moistureIntervalData = new Interval[data.GetLength(0),
data.GetLength(1)];
                Interval[, ] relativePollutionIntervalData = new
Interval[data.GetLength(0), data.GetLength(1)];

                for (var i0 = 0; i0 < data.GetLength(0); i0++)
                {
                    for (var i1 = 0; i1 < data.GetLength(1); i1++)
                    {
                        var value = data[i0, i1];
                        moistureIntervalData[i0, i1] = new Interval(value - value *
MoistureDataDeviation, value + value * MoistureDataDeviation);
                        relativePollutionIntervalData[i0, i1] = new Interval(value - value
* RelativePollutionDeviation, value + value * RelativePollutionDeviation);
                    }
                }

                MoistureData.Add(moistureIntervalData);
                RelativePollutionData.Add(relativePollutionIntervalData);
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    public void SetInitialData(Double moistureDataDeviation, Double
conditionsDataDeviation)
    {
        InitializeDataStructures();
        MoistureDataDeviation = moistureDataDeviation;
        RelativePollutionDeviation = conditionsDataDeviation;
    }

    private void InitializeDataStructures()
    {
        MoistureData = new List<Interval[,]>();
        RelativePollutionData = new List<Interval[,]>();
        Grid = new List<Interval[,]>();
    }
}
}

```

### IntervalExpression.cs

```

using NCalc;
using NCalc.Domain;

namespace MyCustomExpressions
{
    public class CustomIntervalExpression : Expression
    {
        public CustomIntervalExpression(string expression) : base(expression)
        {
            RegisterCustomFunctions();
        }

        public CustomIntervalExpression(string expression, EvaluateOptions options) :
base(expression, options)
        {
        }

        public CustomIntervalExpression(LogicalExpression expression) : base(expression)
        {
        }

        public CustomIntervalExpression(LogicalExpression expression, EvaluateOptions
options) : base(expression, options)
        {
        }

        public new Interval CalculateInterval => (Interval)Evaluate();

        private void RegisterCustomFunctions() => EvaluateFunction += (functionName,
functionArguments) =>
        {
            if (functionName == "CustomAdd")
            {
                functionArguments.Result=
Interval)functionArguments.Parameters[0].Evaluate()          +
(Interval)functionArguments.Parameters[1].Evaluate();
            }
            else if (functionName == "CustomDiv")
            {

```

```
        functionArguments.Result           =  
(Interval)functionArguments.Parameters[0].Evaluate() /  
(Interval)functionArguments.Parameters[1].Evaluate();  
    }  
    else if (functionName == "CustomMult")  
    {  
        functionArguments.Result           =  
(Interval)functionArguments.Parameters[0].Evaluate() *  
(Interval)functionArguments.Parameters[1].Evaluate();  
    }  
};  
}
```

**ДОДАТОК В**  
**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Дивак М.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Порплиця Н.П., Войтюк І.Ф., Тимчишин В.С. Архітектура системи екологічного моніторингу та приклад її застосування для моделювання концентрацій шкідливих викидів автотранспорту // *Індуктивне моделювання складних систем: зб. наук. пр. Київ, 2017. Вип. 9. С. 69-84.*
2. Dyvak M., Rot A., Pasichnyk R., Tymchyshyn V., Huliiev N., Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles // *Sustainability*. 2021; 13(5):2768. <https://doi.org/10.3390/su13052768>.
3. Дивак М. П., Манжула В. І., Мельник А. М., Тимчишин В. С. Система моніторингу забруднення повітря автотранспортом на базі автономного аеромобільного вимірювального комплексу // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2022. 42(2). с.73–83. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2021-42-2-73-83>.
4. Тимчишин В., Отоо Ф. Архітектура програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в ґрунтах та ґрунтових водах // *Вісник ХНУ: Технічні науки*. 2023. Вип № 2 (2023). с.351-360.
5. Тимчишин В.С., Порплиця Н.П., Тимчишин Б.С. Програмний комплекс для моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в часі. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю АСІТ'2017. – Тернопіль: THEU, 2017. с.233-234.*
6. Tymchyshyn V., Porplytsya N., Melnyk A., Tymchyshyn B. Software for Modelling the Air Pollution by Vehicles. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018. pp. 207-210.

7. Litvynchuk M., Spivak I., Krepych S., Spivak S., Krepych R. and Tymchyshyn V. "Approach to Evaluation the Functional Suitability of a Software System Using the Fuzzy Logic Mechanism," *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, Czech Republic. 2019. pp. 273-276. doi: 10.1109/ACITT.2019.8780000.
8. Щур В. В., Тимчишин В.С., Ковбасистий А. В., Лопусевич В. П. Математичне та програмне забезпечення інтеграції даних інформаційних систем. *Матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів «Комп'ютерні інформаційні технології» CIT'2019, 29 листопада 2019р., Тернопіль* ст. 54-55.
9. Мельник А.М., Тимчишин В.С., Ковбасистий А.В., Романюк М.В. Математичне та програмне забезпечення управління реплікаціями в базах даних типу NoSQL. *Матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів «Комп'ютерні інформаційні технології» CIT'2019, 29 листопада 2019р., Тернопіль* с. 24.
10. Dyvak M., Melnyk A., Kovbasisty A., Shevchuk R., Huhul O. and Tymchyshyn V. "Mathematical Modeling of the Estimation Process of Functioning Efficiency Level of Information Web-Resources," *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany. 2020. pp. 492-496. doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208846.
11. Dyvak M., Rot A., Tymchyshyn V., Valchyshyn S., Otoo F. and Hernes M. "Hardware Components of the Monitoring System of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions From Vehicles," *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany. 2021. pp. 608-612, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.
12. Tymchyshyn V., Otoo F., Komar M., Shpak V., Semaniuk V. and Fronchko V. "Model of an Autonomous Airmobile Complex for Measuring Air Pollution Concentrations by Vehicles," *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ruzomberok, Slovakia. 2022. pp. 423-427. doi: 10.1109/ACIT54803.2022.991316.

## ДОДАТОК Г

## АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Затверджую  
 Генеральний директор  
 Державної установи  
 «Тернопільський обласний центр  
 контролю та профілактики хвороб  
 Міністерства охорони здоров'я  
 України»



Оксана ЧАЙЧУК

2023 р.

## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
 ТИМЧИШИНА Василя Степановича  
 на тему «Методи та програмні засоби для моделювання забруднення  
 ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту»

Ми, комісія у складі: Юлії КРАВЧУК, Василя ПАВЛИКА, склали даний акт про те, що при удосконаленні системи контролю та моніторингу ґрунтів та ґрунтових вод у Тернопільській області використано результати дисертаційної роботи викладача кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету ТИМЧИШИНА Василя Степановича, а саме: програмну систему, яка інтегрує програмне забезпечення інформаційно-вимірювального комплексу, та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту на основі методу математичного моделювання таких процесів з допомогою диференціальних рівнянь в частинних похідних, що забезпечує зниження вартості процесів контролю забруднення навколишнього середовища.

Заступник директора із впровадження  
 системи управління якістю

Юлія КРАВЧУК

Завідувач санітарно-гігієнічної  
 лабораторії

Василь ПАВЛИК



ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. проректора з наукової роботи  
Західноукраїнського національного університету  
д.т.н., проф. Микола ШИВАК

«04» вересня

2023 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Тимчишина Василя Степановича

**«Методи та програмні засоби для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту»**

Комісія у складі: голови — в. о. декана факультету комп'ютерних інформаційних технологій, к.т.н., доц. Якименка І.З. та членів: начальника науково-дослідної частини, д.с.н., проф. Семанюк В.О., начальника планово-фінансового відділу Кушніра О.Р. склали цей акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Тимчишина В.С. використані під час виконання науково-дослідних робіт на кафедрі комп'ютерних наук факультету комп'ютерних інформаційних технологій згідно з пріоритетним напрямом «Інформаційні та комунікаційні технології» з безпосередньою участю автора, а саме:

– НДР " Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод" (2020 р., № держресстрації 0120U102040). Автор запропонував метод математичного моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на диференціальних рівняннях в частинних похідних із початковими умовами, заданими за результатами вимірювань концентрації забруднюючих речовин у газоподібному стані на поверхні ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів;

– НДР "Методи, засоби та інформаційна технологія ідентифікації джерел забруднень приземистого шару атмосфери на основі їх математичних моделей." (2020 р., № держресстрації 0120U100880). Автором розроблено архітектуру програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує програмне забезпечення інформаційно вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів, що у сукупності забезпечило спрощення процесів моделювання забруднення ґрунтів;

– НДР "Розробка методів та алгоритмів захищеного зберігання даних" (2021 р., № держресстрації 0121U114705). Автором розроблено програмно-технічний комплекс для моніторингу забруднення ґрунтів, який, на відміну від існуючих, забезпечує опосередковану оцінку концентрацій забруднюючих речовин у ґрунтах за результатами вимірювань концентрацій газоподібних шкідливих речовин на поверхні ґрунтів, що забезпечує зниження вартості процесів контролю забруднення ґрунтів.

А також за госпдоговірною тематикою:

– НДР «Онлайн система «Терногаз»» (2019 р., № держресстрації 0119U102841, замовник – ТзОВ «Терногаз»). Автором запропоновано підхід до оцінки функціональної придатності програмної системи за допомогою механізму нечіткої логіки.

Голова комісії:

В. о. декана факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій,  
к. т. н., доц.



Ігор ЯКИМЕНКО

Члени комісії:

начальник науково-дослідної  
частини, д. с. н., проф.



Віта СЕМАНЮК

начальник  
планово-фінансового відділу



Олексій КУШНІР



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
«ІТЕСТ АЙТІ ІНКОРПОРЕЙТЕД ФОРТЕ ГРУП»

46008, м. Тернопіль, вулиця Живова, 32, офіс 37, тел.0672753777  
ЄДРПОУ 38910399  
Р/р UA 32 322313 0000026006000020780 в Філія АТ Укрексімбанк в м. Тернопіль  
МФО 322313

№ 15

10 травня 2023 р.

## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Тимчишина Василя Степановича  
**«Методи та програмні засоби для моделювання забруднення ґрунтів  
шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту»**

Даний акт складений про те, що при реалізації програмних продуктів в ТОВ «ІАІ ФОРТЕ ГРУП» використано результати дисертаційної роботи викладача кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Тимчишина Василя Степановича, а саме архітектуру програмної системи для моделювання процесів забруднення атмосфери та ґрунтів шкідливими викидами автотранспорту.

Розроблена автором архітектура включає необхідні модулі для введення початкових умов, виконання обчислень, візуалізації результатів та можливості внесення коректив в математичні моделі, що дозволило оптимізувати розробку, тестування та супровід програмного забезпечення для клієнтів компанії.

Заступник директора



Христина ФЕДОРЧУК



ЗАТВЕРДЖУЮ  
 В.о. проректора  
 з науково-педагогічної роботи  
 Західноукраїнського  
 національного університету  
 к.е.н., доцент Віктор ОСТРОВЕРХОВ

«07» вересня 2023 р.

АКТ



про впровадження в освітній процес Західноукраїнського національного університету результатів дисертаційної роботи  
 Тимчишина Василя Степановича  
 «Методи та програмні засоби для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту»

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи Тимчишина Василя Степановича на тему: «Методи та програмні засоби для моделювання забруднення ґрунтів шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту» використані в освітньому процесі факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету для студентів спеціальності «Інженерія програмного забезпечення» та «Інформаційні системи та технології».

При викладанні дисциплін «Конструювання програмного забезпечення», «Якість програмного забезпечення та тестування» та «Архітектура та проектування програмного забезпечення» розглядаються особливості проектування, конструювання та тестування програмної системи для моделювання процесів забруднення ґрунтів шкідливими викидами вихлопних газів автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує програмне забезпечення інформаційно вимірювального комплексу та засоби відображення поточної ситуації щодо забруднення ґрунтів.

В. о. декана факультету комп'ютерних  
 інформаційних технологій,  
 к.т.н., доцент

 Ігор ЯКИМЕНКО

Завідувач кафедри  
 комп'ютерних наук, д.т.н., професор

 Андрій ПУКАС