

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 (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., Huliiiev 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-WS*. 2018. Vol. 2300. 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(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-WS*. 2018. Vol. 2300. 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.