

МАНЖУЛА ВОЛОДИМИР

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5222-8443>e-mail: v.manzhula@wunu.edu.ua**ФАЙФУРА ВАСИЛЬ**

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0009-0007-0896-4428>e-mail: vasyl.faufura@gmail.com

АРХІТЕКТУРА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ МІКРОПЛАСТИЧНИХ МАС У ПОВІТРІ

У статті розглядається проблема неконтрольованого поширення мікропластику в повітрі та його розпаду. Проаналізовано наявні дослідження та публікації, присвячені виявленню, моніторингу та візуалізації поширення мікропластичних частинок. Запропоновано гнучку геоінформаційну систему для комплексного моніторингу та моделювання розповсюдження мікропластику в атмосферному середовищі. Описано програмні та апаратні компоненти системи, зокрема блок відбору проб повітря та модель розсіювання мікропластику. Також представлено математичний апарат для прогнозування поширення забруднення.

Система включає портативну станцію, оснащену датчиками для вимірювання концентрації частинок у повітрі та хмарну інфраструктуру для збереження та обробки даних. Отримана інформація використовується для моніторингу в реальному часі, прогнозування розповсюдження та визначення географічних зон забруднення. Запропонована архітектура є масштабованою, адаптивною та може бути інтегрована з іншими апаратними і програмними рішеннями.

Ключові слова: забруднення повітря мікропластиком, геоінформаційна система, ГІС, моніторинг у реальному часі, моделювання, візуалізація даних, Raspberry Pi.

MANZHULA VOLODYMYR, FAIFURA VASYL

West Ukrainian National University

ARCHITECTURE OF THE GEO-INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING AND MODELING THE SPREAD OF MICROPLASTIC MASSES IN THE AIR

The article explores the problem of uncontrolled microplastic spread in the air and its disintegration. It reviews existing studies and publications focused on detecting, monitoring, and visualizing the distribution of microplastic particles.

A universal geoinformation system architecture is proposed for comprehensive monitoring and modeling of microplastic spread in the air. The article describes both the software and hardware components of the system, including an air sampling unit, a modeling system for microplastic dispersion, as well as the mathematical component for pollution spread modeling.

The system is designed around a portable station equipped with sensors that measure airborne particles, alongside a web interface for data visualization and analysis. The station continuously gathers data on microplastic concentrations in the air and transmits it to cloud storage for further processing and pollution modeling. The web interface allows users to visualize spatial pollution patterns and configure system parameters. Article also details the architecture of the portable station used for air sampling, including the integration of its hardware components and software. The system enables real-time monitoring, prediction of microplastic dispersion, and provides geographic data on pollution zones. The proposed architecture leverages cloud technologies, ensuring scalability, flexibility, and seamless integration with other hardware and software solutions.

Keywords: air pollution by microplastics, geoinformation system, GIS, real-time monitoring, modeling, data visualization, Raspberry Pi.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Незважаючи на значний прогрес у виявленні та класифікації мікропластику, існує низка невирішених питань стосовно оцінок його загального обсягу, розподілу і впливу на стан окремих компонентів довкілля і екосистемну динаміку. Якщо стосовно водного середовища такі дослідження представлені широко, то завдання моніторингу поширення мікропластику у атмосфері поки що не отримало широкої дослідницької уваги. В першу чергу це визначено складнощами ідентифікації та вловлювання цих частинок у повітрі.

Мікропластик – це дрібні частками пластику, діаметром менше 5 мм, які широко розповсюджені в навколишньому середовищі та можуть негативно впливати на здоров'я людей і екосистем. Ці частинки потрапляють у повітря, воду та ґрунт через різні джерела, включаючи промислові викиди, транспорт і продукти повсякденного використання. Однією з причин відсутності великої кількості досліджень стосовно поширення мікропластичних частинок у повітрі є їхня дезінтеграція – частинки мікропластику невидимі та невідчутні, що створює ілюзію їхньої відсутності. Це знижує сприйняття проблеми як важливої та обмежує дослідницький інтерес.

Предмет поширення мікропластику у повітрі потребує розробки нових підходів, засобів та інструментів, зокрема візуалізації. На сьогоднішній день, для виявлення та аналізу мікропластику використовуються переважно лабораторні методи. І хоча вони забезпечують високу точність, вони є дорогими, потребують тривалого часу для обробки зразків і не підходять для швидкого моніторингу в польових умовах та великих масштабах. Ще одним фактором є відсутність стандартизації таких методів

та варіативність результатів в залежності від лабораторії та методу дослідження. Крім того, проведення таких досліджень вимагає встановлення спеціальних фільтрів для збору зразків для подальшої обробки, що ускладнює їх використання для оперативного аналізу просторового поширення мікропластику на великих територіях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження мікропластику наштовхується на дві головні проблеми. Перша з них – недостатнє інформаційне забезпечення досліджуваної проблеми через наявні сьогодні технічні рішення щодо ідентифікації концентрацій мікропластичних мас у довкіллі. Інша – контроль за поширенням цього виду забруднюючих речовин у середовищі і наслідків його міграції та акумуляції. Поведінка мікропластичних мас важко передбачувана. При цьому існує безліч джерел мікропластику, серед яких, виробничі підприємства, переробні заводи, сільське господарство, текстильна промисловість, знос шин автомобілів тощо [1].

Значна частина пластику проходить шлях від нагромадження до мікронізації значної частини цього матеріалу, а, відтак, і до дематеріалізації його присутності у різних компонентах довкілля. Мікронізовані частинки акумулюються за певних обставин як окремий вид антропогенних відкладів, впливають на здоров'я людини та детермінують рівні біологічного різноманіття [2]. За інших – поширення мікропластичних мас спричиняють функціональну деградацію екосистем, змінюють їх властивості і функції, порушують екосистемну цілісність організмів, які населяють різні середовища [3].

Стосовно досліджень вмісту мікропластику в довкіллі низкою авторів наголошується на непослідовності підходів калькуляції вмісту мікропластику та складнощях порівняння результатів отриманих на різних установках з використанням різного програмного забезпечення та відсутності стандартизації у трактуванні результатів досліджень мікропластиків [4]. Це сприяло розробці спеціальних програмних продуктів із можливістю порівняння результатів аналізу із приладів різних виробників [5]. Вектори сучасних технічних рішень стосовно ідентифікації поширення мікронізованих пластичних мас засновані на використанні комп'ютерного зору та елементів машинного навчання для автоматичного підрахунку і класифікації мікропластику [6], реконструкції низькоякісних результатів Фур'є-спектроскопії та Раманівської спектроскопії й покращення ідентифікації різних типів мікропластику в зразках навколишнього середовища [7]. Машинне навчання часто поєднують із оптичними елементами (датчиками), використанням методів флуоресцентної та лазерної візуалізації, що дозволяє не лише чітко розрізнити забарвлені мікропластичні частинки під мікроскопом, а й виявляти і класифікувати різні типи мікропластику [8; 9]. Контроль і спостереження за поведінкою мікропластичних покладається на створення високоефективних ГІС-систем для моніторингу мікропластику і візуалізації його поширення задля ґрунтового розуміння дисперсії та виявленні гарячих точок забруднення у різних середовищах [10; 11]

Формулювання цілей статті

Метою статті є вдосконалення методів виявлення та аналізу мікропластику через обґрунтування та розробку архітектури геоінформаційної системи для вимірювання та візуалізації його розподілу в повітрі, разом із її апаратними та програмними компонентами та математичними моделями поширення мікропластичних частинок. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз існуючих методів детекції, візуалізації та прогнозування розповсюдження мікропластику;
- розробити архітектуру апаратного комплексу для моніторингу та програмного забезпечення ГІС;
- запропонувати математичний апарат для моделювання поширення мікропластичних мас в атмосфері.

Виклад матеріалу дослідження

Проектування системи. Система моніторингу та моделювання поширення забруднення середовища мікропластиком повинна забезпечувати повноту функціоналу для кінцевого користувача. Для побудови правильної та гнучкої архітектури спочатку було окреслено можливі варіанти використання системи та послідовність виконання дій користувачем. На рисунку 1 представлено діаграму основних варіантів використання системи для моделювання поширення мікропластичних мас. В системі виділено наступних акторів – користувач веб сервісу та оператор портативної вимірювальної станції. Для кожного із акторів система забезпечує перелік варіантів використання притаманних його ролі.

Для користувачів веб-сервісу виділено наступні основні варіанти використанні системи: управління проектами, перегляд даних вимірювань, моделювання поширення забруднення, перегляд результатів моделювання, запуск віддаленого відбору проб, моніторинг стану станції.

В свою чергу для оператора портативної станції визначено наступні варіанти використання: запуск відбору проб, перегляд результатів, налаштування параметрів станції. На рисунку 2 представлено діаграму послідовностей роботи системи, яка детально описує послідовність виконання подій та взаємодію між компонентами системи на користувачем.



Рис. 1. Діаграма варіантів використання

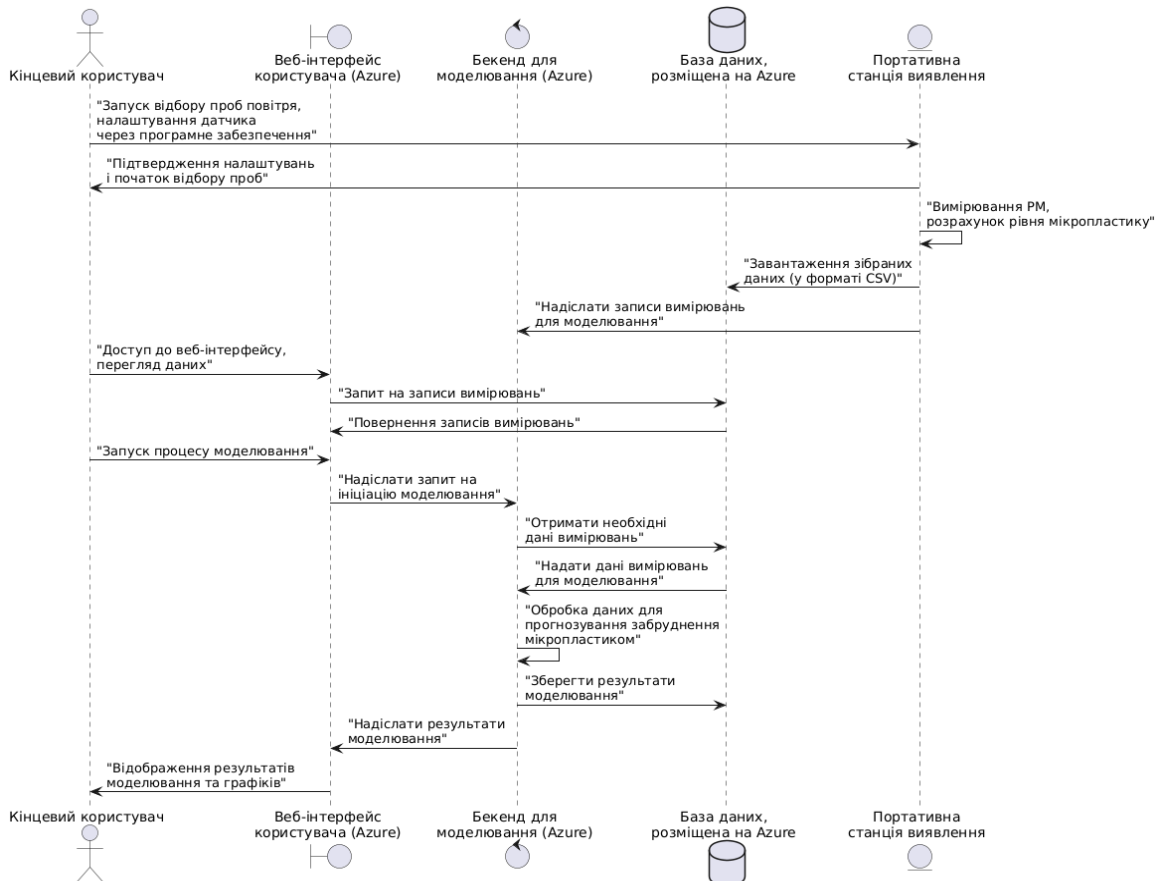


Рис. 2. Діаграма послідовностей роботи системи моделювання поширення мікропластику

Архітектура системи. Запропоноване рішення для виявлення, моніторингу та моделювання мікропластику є комплексною системою, призначеною для збору даних у реальному часі, ефективної хмарної обробки даних та надання інформативної візуалізації. Архітектура має два основних сегменти: портативна станція виявлення, розгорнута для збору даних у полі, та компоненти, які відповідають за обробку, зберігання та аналіз даних, а також надання доступу користувачам через веб-інтерфейс. Розроблена архітектура відповідає принципам Cloud Native. Cloud native – це підхід до створення та управління додатками, що використовує контейнеризацію, мікросервіси та хмарні сервіси для забезпечення масштабованості, надійності та ефективного використання ресурсів [12].

Дані, зібрані з різних датчиків, розгорнутих на станції виявлення, передаються в інфраструктуру Azure Cloud. Тут дані зберігаються, обробляються та стають доступними користувачам через веб-інтерфейс. На рисунку 3 представлено загальний вигляд архітектури системи.

Увесь робочий процес автоматизований для забезпечення мінімального втручання людини, що робить систему придатною для широкомасштабних польових досліджень та аналізу мікропластику і його впливу на навколишнє середовище. Запропонований підхід дозволяє створити повноцінне рішення для тривалого автономного вимірювання та моніторингу.

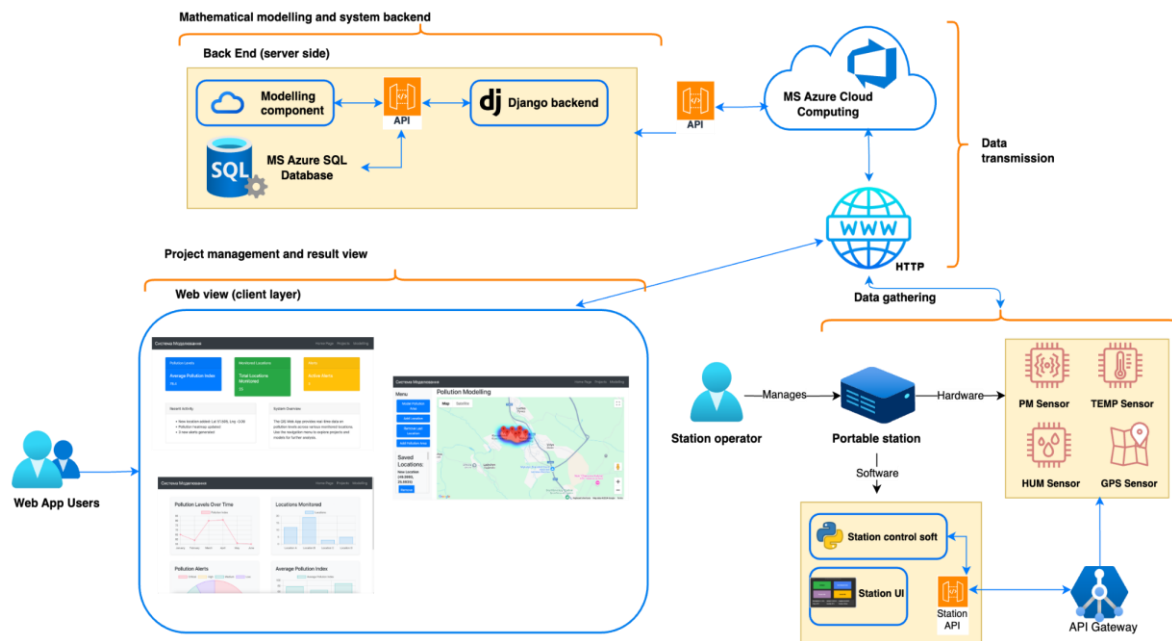


Рис. 3. Загальна архітектура системи моніторингу

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

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

Для підключення сенсорів та додаткового обладнання використовуються наявні інтерфейси Raspberry Pi (рисунок 4).

Ключовим елементом системи є датчик Nova SDS01. Це професійний сенсор для вимірювання концентрації пилу в повітрі, який використовує лазерну технологію. Час реакції складає менше 10 секунд, що дозволяє швидко реагувати на зміни в навколишньому середовищі. Значення передаються кожну секунду в стандартному режимі роботи [13]. Інтеграція елементів та прилад кінцевий зображено на рисунку 5.

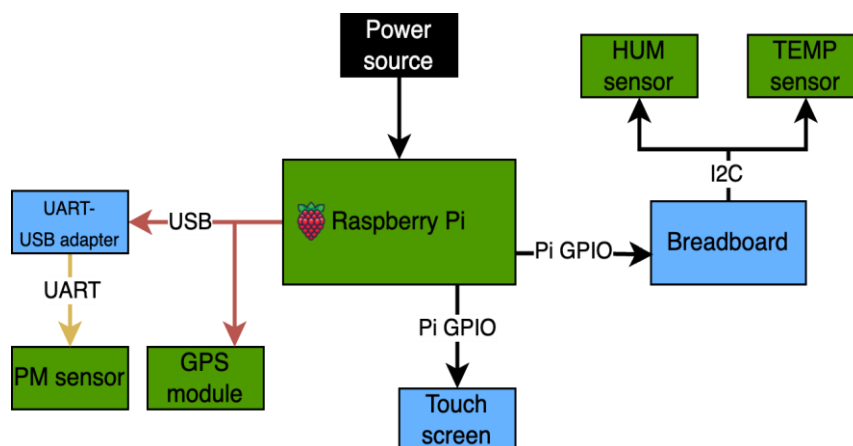


Рис. 4. Схема підключення апаратного забезпечення

Raspberry Pi виконує роль оркестратора, керуючи зчитуванням датчиків, здійснюючи попередню перевірку даних і забезпечуючи зв'язок із хмарною інфраструктурою. Станція живиться від павербанку потужністю 20 Вт, що робить її повністю портативною та легко розгортуюваною в різних місцях для збору різноманітних наборів даних.



Рис. 5. Інтеграція елементів станції з Raspberry Pi

Математичне забезпечення. Поширення мікропластику в атмосфері є складним процесом, який залежить від багатьох факторів, таких як турбулентність, швидкість та напрямок вітру, гравітація, хімічний склад частинок, а також антропогенні чинники. Математичні моделі можуть бути інтегровані у геоінформаційні системи (ГІС) для просторового та часового моделювання, що дозволяє оцінювати ризики та поширення мікропластику.

Ключові факторами для моделювання є: розмір і щільність частинок, що визначають швидкість осадження та підйому в атмосфері; метеорологічні умови, зокрема вектор швидкості вітру впливає на горизонтальне перенесення частинок; турбулентність, що описується за допомогою коефіцієнтів турбулентної дифузії; гравітація, яка враховується для моделювання осадження частинок; сезонні фактори, що включають зміни кліматичних умов, дощі та снігопади, які сприяють осадженню мікропластику.

Математичні моделі, що входять до математичного забезпечення ГІС.

1. Модель Гауса, яка широко використовується для моделювання розповсюдження забруднень у атмосферному повітрі в рамках геоінформаційних систем (ГІС) [14]. В основі алгоритму лежить припущення, що концентрація забруднюючої речовини розподіляється у просторі за нормальним статистичним законом. Реалізація цієї моделі в ГІС спрощується, включаючи такі припущення: забруднення не впливає на характеристики повітряного потоку (пасивна дисперсія); молекулярна та поздовжня дифузія є незначними порівняно з турбулентною дисперсією; турбулентні потоки описуються лінійними залежностями; бічна складова швидкості вітру та вертикальна швидкість дорівнюють нулю; розглядається ідеальний випадок рівної поверхні землі.

Для наближених оцінок використовується рівняння, що описує поширення забруднення мікропластиком для нестационарного випадку:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \cdot e^{-\left[\frac{(x-x_0)-ut}{2\sigma_x^2}\right]^2} \cdot e^{-\left[\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]} \cdot \left(e^{-\left[\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]} + e^{-\left[\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \right), \quad (1)$$

де

$C(x, y, z, t)$ – концентрація забруднюючої речовини в точці з координатами x, y, z в момент t , $г/м^3$;

Q – інтенсивність безперервного точкового джерела забруднення, $г/с$;

u – швидкість вітру на висоті H метрів, $м/с$;

H – ефективна висота джерела забруднення, $м$;

t – час перенесення, $с$;

$\sigma_x\sigma_y$ – горизонтальні дисперсії, $м$;

σ_z – вертикальна дисперсія, $м$; x_0, y_0 .

H – координати точкового джерела забруднення, $м$.

Слід відмітити недоліки моделей Гауса у випадку моделювання поширення частинок мікропластику: мікропластик поширюється під впливом неоднорідної турбулентності, яку моделі Гауса не враховують; також мікропластик може мати різні розміри, форму та щільність, що впливає на його рух у середовищі.

У ГІС модель Гауса застосовується для прогнозування дисперсії забруднень від наземних джерел, наприклад, промислових підприємств або транспортних потоків. Вона також підходить для моделювання як безперервних, так і періодичних викидів, дозволяючи створювати багатошарові карти розподілу концентрацій для попередньої оцінки поширення мікропластику у простих умовах (наприклад, від одного джерела в стабільному середовищі з постійною течією чи вітром) та для великомасштабного (регіонального) моделювання, де дрібні деталі не є критичними.

2. Модель Ейлера турбулентного розсіювання для частинок мікропластику. Математичне моделювання поширення частинок мікропластику здійснюється на основі рівняння конвективної дифузії:

$$\frac{dC(x, y, z, t)}{dt} + \frac{d(u \cdot C(x, y, z, t))}{dx} + \frac{d(v \cdot C(x, y, z, t))}{dy} + \frac{d(w \cdot C(x, y, z, t))}{dz} + \delta \cdot C(x, y, z, t) = D \cdot C(x, y, z, t) + Q, \quad (2)$$

де

u, v, w – компоненти поля вітру за напрямком осей x, y, z відповідно, м/с;

δ – коефіцієнт, що враховує реакції частинок мікропластику з навколишнім середовищем;

D – коефіцієнт дифузії.

Це рівняння є універсальним для моделювання конвективно-дифузійних процесів у атмосфері, і його адаптація залежить від конкретної задачі, фізичних властивостей середовища та джерел забруднення. Модель Ейлера краще підходить для опису великих масштабів і середовищ із постійними або прогнозованими характеристиками, зокрема таких як атмосфера.

3. Моделі динаміки концентрацій забруднення мікропластиком на основі інтервальних різницевих операторів. Модель динаміки концентрацій забруднення мікропластиком можна представити у загальному вигляді таким різницеvim оператором (РО) [15]:

$$[C_k^-; C_k^+] = \vec{\varphi}^T(\vec{g}) \cdot \vec{f}([C_0^-; C_0^+], \dots, [C_{k-1}^-; C_{k-1}^+], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k), k = d, \dots, K, \quad (3)$$

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

$\vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k$ – вектори вхідних змінних, що визначають погодні умови та коефіцієнти взаємодії із зовнішнім середовищем;

d – порядок дискретної моделі;

\vec{g} – вектор параметрів моделі;

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

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

В основу застосування моделей даного виду покладено можливість отримання інтервальних значень відсотку концентрації частинок мікропластику у завислих речовинах із використанням портативних приладів, що вимірюють загальний вміст завислих частинок (PM10, PM2,5) у завислих речовинах (ЗР), а лабораторні методи визначають вміст мікропластику (P) у цих матеріалах на основі невеликої вибірки. Запропоновано використовувати методику для оцінки можливих значень вмісту мікропластику в загальному складі завислих частинок на основі цих вимірювань.

Основні етапи методики:

Збір даних. За допомогою портативних приладів вимірюється вміст завислих частинок (PM10, PM2,5), $C_{portable}$. Це значення відображає кількість частинок у ЗР залежно від середовища.

Визначення вмісту мікропластику у РМ.

Лабораторними методами визначається відсоткова частка мікропластику (P) в цих частках PM10, PM2,5.

$$[P_{lab}] = [P_{min}; P_{max}], \quad (4)$$

де

P_{min}, P_{max} – це мінімальний та максимальний відсоток вмісту мікропластику у замірах $C_{portable}$, отриманих при лабораторному аналізі.

Оцінка діапазону можливих значень вмісту мікропластику в РМ:

Для оцінки можливого вмісту мікропластику в РМ, маючи інтервальні значення відсотку вмісту мікропластику, обчислюємо інтервали для вмісту мікропластику в завислих матеріалах за формулою:

$$[C_k^-; C_k^+] = C_{portable,k} \cdot [P_{lab}]. \quad (5)$$

Коригування. Якщо зібрано достатньо даних для різних проб, можна уточнити отриманий інтервал $[P_{lab}]$ або провести коригування шляхом аналізу додаткових вимірювань $C_{portable}$.

Економічний ефект від застосування методики оцінки вмісту мікропластику у завислих речовинах (РМ) на основі інтервальних значень є значним, оскільки вона дозволяє оптимізувати процеси вимірювання та аналізу. Лабораторні аналізи є дорогими і потребують часу для підготовки проб, проведення аналізу та обробки результатів. За допомогою портативних приладів можна швидко отримати орієнтовні дані, що дозволяє значно скоротити кількість лабораторних вимірювань, необхідних для підтвердження результатів.

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

частинок подано на рисунку 6. Для покращення точності вимірювання завислих частинок виконується програмне калібрування показників на основі логарифмічної залежності між співвідношенням PM2.5/PM10 [16].

```

1 usage
2 class SDS811:
3     def __init__(self, port='/dev/ttyUSB0', baudrate=9600, timeout=2):
4         """Ініціалізація SDS811"""
5         self.ser = serial.Serial(port, baudrate=baudrate, timeout=timeout)
6
7     1 usage
8     def read_frame(self):
9         while True:
10            start_byte = self.ser.read(size=1)
11            if start_byte == b'\xaa':
12                frame = self.ser.read(size=9)
13                if frame[0] == 0xc0:
14                    return start_byte + frame
15
16 1 usage
17 def parse_frame(self, frame):
18     """Парсинг фреймів значень PM2.5 та PM10 в мкг/м³."""
19     data = struct.unpack(_format: '<HxxBB', frame[2:])
20     pm25 = data[0] / 10.0
21     pm10 = data[1] / 10.0
22     return pm25, pm10
23
24 import numpy as np
25 import pandas as pd
26 import matplotlib.pyplot as plt
27
28 1 usage
29 def calibrate_pm25(pm25_sds, pm10_sds):
30     """ Розрахунок співвідношення PM10/PM2.5 """
31     ratio_pm10_pm25 = pm10_sds / pm25_sds if pm25_sds > 0 else 1.0
32
33     """ Функція логарифмічного калібрування """
34     calibration_factor = -0.509 * np.log(ratio_pm10_pm25) + 1.2203
35
36     """ Застосування калібрування для значення PM2.5 """
37     pm25_calibrated = pm25_sds / calibration_factor if (calibration_factor >
38                                                         0) else pm25_sds
39
40     return pm25_calibrated
    
```

Рис. 6. Фрагмент лістингу програмного коду модуля роботи із сенсором завислих частинок

Для розробки веб-сайту використано Django – сучасний фреймворк для створення веб-застосунків на Python. Django забезпечує структурований підхід до побудови веб-систем, надаючи вбудовані засоби для роботи з базами даних, маршрутизації запитів, обробки форм та створення адміністративного інтерфейсу. Цей фреймворк реалізує шаблон проектування MVT (Model-View-Template), що спрощує розділення логіки, вигляду та даних застосунку [17]. Django також робить акцент на повторне використання компонентів, що прискорює розробку та підвищує якість коду. Загальна архітектура проекту із використанням Django наведена на рисунку 7.

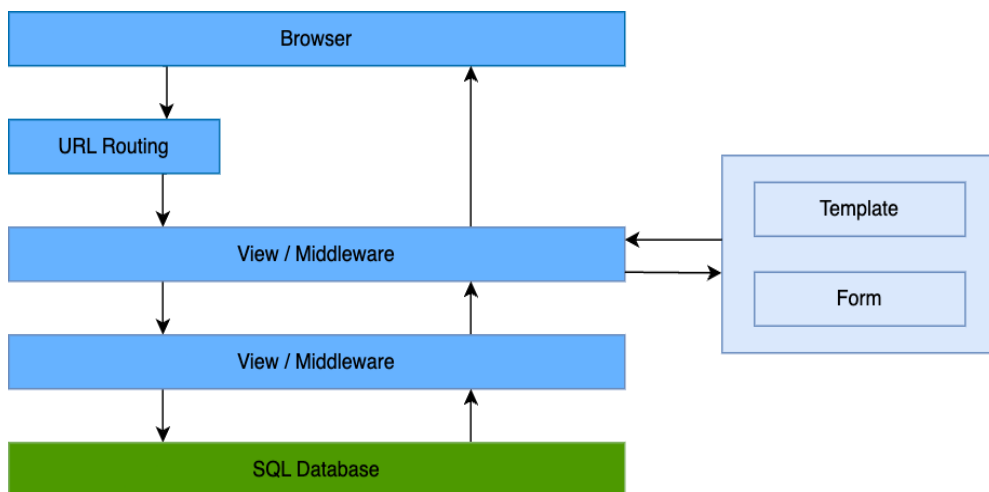


Рис. 7. Узагальнена архітектура фреймворку Django

Взаємодія між портативною станцією виявлення та серверною частиною здійснюється за допомогою REST API, що забезпечує безпечну передачу даних через HTTPS протокол. API портативної станції містить набір ендпоінтів, основними з яких є:

- /collectSensorData (POST) - керування сенсорами стації;
- /processData (POST) - локальна обробка даних;
- /uploadProcessedData (POST) - завантаження даних в хмару.

Загальна схема архітектури API інтерфейсів системи наведено на рисунку 8.

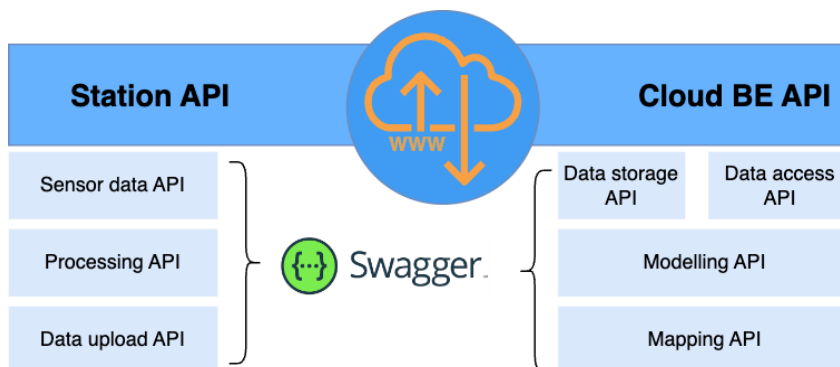


Рис. 8. Архітектура API системи

Для забезпечення збереження всієї інформації, необхідної для ефективного функціонування системи використано Azure SQL Database. Azure SQL Database – це універсальна хмарна база даних, що підтримує геопросторові дані, графи та JSON у мові T-SQL. Вона пропонує високу продуктивність, масштабованість, безпеку і різні варіанти розгортання, такі як еластичні пули, гіпермасштаб, керовані екземпляри або безсерверне середовище [18].

Механізми резервного копіювання та відновлення гарантують збереження даних навіть у разі збоїв системи. Структура бази даних у вигляді ER діаграми наведено на рисунку 9.



Рис. 9. ER-діаграма бази даних

Графічний інтерфейс. Графічний інтерфейс портативної станції побудовано за допомогою вбудованої бібліотеки Tkinter. На відміну від інших бібліотек для створення графічного інтерфейсу, таких як PyQt чи Kivy, Tkinter вже є частиною стандартної бібліотеки Python [19]. Використання нативної бібліотеки обумовлено у мінімізації залежностей для швидкого розгортання програмного забезпечення та зменшення енергоспоживання. Головне вікно програми наведено на рисунку 10.

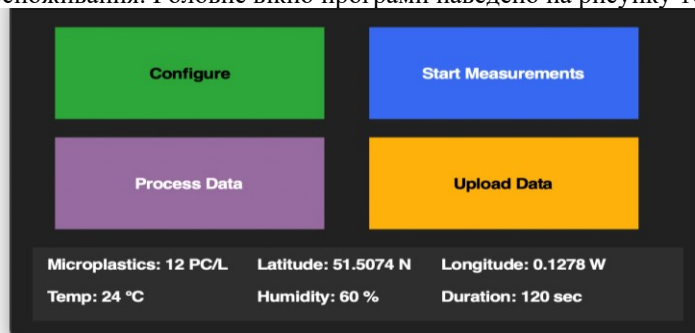


Рис. 10. Головне меню портативної станції

Для користувача доступні меню конфігурації, опції початку забору проб та локальної обробки даних, а також функція завантаження даних на віддалений сервер для подальшого моделювання. Додатково у нижній частині екрану відображаються поточні показники датчиків станції.

Інтерфейс вебсистеми побудований за допомогою класичного стеку веб технологій, зокрема HTML, CSS (з використанням Bootstrap) та JavaScript. Головна сторінка містить посилання на сторінку з проектами, сторінку моделювання, а також відображає загальні відомості про систему (рисунок 11).

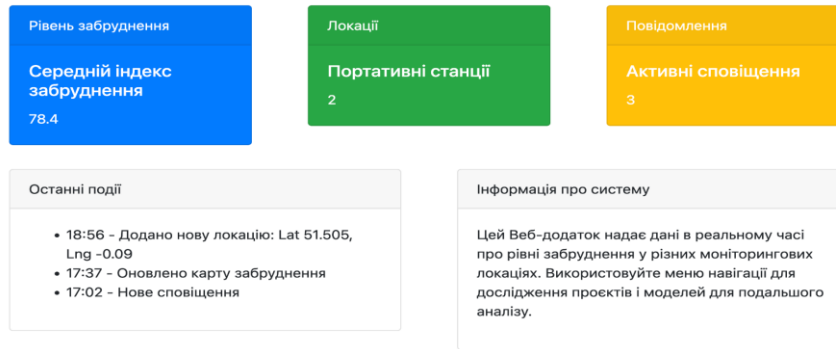


Рис 11. Головна сторінка вебсистеми

Висновки з даного дослідження

I перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблена архітектура геоінформаційної системи моніторингу і моделювання поширення мікропластику у повітрі є кроком до контрольованого поширення мікропластику та моніторингу забруднення повітряного середовища. Розроблена система дозволяє дослідникам ефективно та економічно вигідно здійснювати взяття замірів завислих частинок у повітрі та використовувати широкий спектр апаратних, програмних та математичних засобів. Запропонована архітектура дозволяє вносити зміни та покращення до системи із кожною новою ітерацією та інтегрувати нові математичні моделі разом із новими апаратними засобами. Гнучкість же забезпечується за допомогою використання хмарних обчислень та розподілення функціоналу між портативною станцією та веб-сервісами. Геоінформаційна система надає можливість дослідникам збирати відомості про поширення мікропластику, прогнозувати та створювати наочну візуалізацію зони поширення забруднення. Візуалізація відіграє ключову роль у збільшенні обізнаності людей щодо проблем та небезпеки поширення мікропластику. Використання портативних станцій та математичного моделювання забезпечує доступ до ефективного способу моніторингу мікропластику громадам, підприємцям та усім зацікавленим особам. Застосування методики оцінки вмісту мікропластику в завислих речовинах на основі інтервальних значень дозволяє значно знизити витрати на лабораторні дослідження, оптимізувати використання обладнання, підвищити ефективність моніторингу та контролю, зменшити операційні витрати та знизити ризики, пов'язані з порушенням екологічних стандартів. Все це призводить до зниження загальних витрат на екологічний моніторинг і підвищення економічної ефективності підприємства або організації, яка здійснює моніторинг забруднення.

У подальших роботах планується розгортання ширшого спектру математичних моделей для прогнозування поширення мікропластику та його поведінки, а також створення універсального інтерфейсу для підтримки додаткового апаратного забезпечення.

Література

1. N. Svensson and Y. Andersson-Sköld, 'Dispersion and fate models for microplastics from tyre and road wear : state of the art and possibilities', *Statens väg- och transportforskningsinstitut*, Linköping, 2021. URL: <https://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:1616069/FULLTEXT01.pdf>
2. Фортуна М.В., Борисовська О.О. Оцінка забруднення водного середовища мікропластиком. *Національний гірничий університет. Збірник наукових праць*, Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2021, № 65, С. 195-206. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.195>
3. Jain R., Gaur A., Suravajhala R., Chauhan U., Pant P., Tripathi V., Pant G. Microplastic pollution: Understanding microbial degradation and strategies for pollutant reduction, *Science of The Total Environment*, Volume 905, 2023, 167098, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167098>
4. Wang Y., Zhang B., Zhang R., Wei Y., Wang Y., Zhu R. Microplastic Pollution Research Based on the VOS Viewer Software: Research Trends, Ecological Effects, and Testing Methods. *Atmosphere*. 2023; 14(5):838. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14050838>
5. Primpke S, Cross RK, Mintenig SM, et al. Toward the Systematic Identification of Microplastics in the Environment: Evaluation of a New Independent Software Tool (siMPle) for Spectroscopic Analysis. *Applied Spectroscopy*. 2020;74(9):1127-1138. DOI: <https://doi.org/10.1177/0003702820917760>
6. Massarelli C., Campanale C., Uricchio VF. A Handy Open-Source Application Based on Computer Vision and Machine Learning Algorithms to Count and Classify Microplastics. *Water*. 2021; 13(15):2104. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152104>
7. Josef Brandt, Karin Mattsson, and Martin Hassellöv. Deep Learning for Reconstructing Low-Quality FTIR and Raman Spectra—A Case Study in Microplastic Analyses, *Analytical Chemistry*, 2021, 93 (49), 16360-16368. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c02618>

8. Sturm MT., Myers E., Schober D., Korzin A., Schuhen K.. Development of an Inexpensive and Comparable Microplastic Detection Method Using Fluorescent Staining with Novel Nile Red Derivatives. *Analytica*. 2023; 4(1):27-44. DOI: <https://doi.org/10.3390/analytica4010004>
9. Ekrem Kursad Dal, Recai Kilic. Design and Implementation of a Microplastic Detection and Classification System Supported by Deep Learning Algorithm, 25 January 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3890356/v1>
10. Nyadjro, E.S., Webster, J.A.B., Boyer, T.P. et al. The NOAA NCEI marine microplastics database. *Sci Data* 10, 726 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02632-y>
11. Rauf, A.U., Sofiany, I.R., Fashani, Y., Al Naday, Q., Sulistiowati (2024). Application of Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) in Microplastic Studies Around Asia. In: Egbueri, J.C., Ighalo, J.O., Pande, C.B. (eds) *Microplastics in African and Asian Environments. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-64253-1_25
12. Oyeniran O.C., Modupe O.T. Otitoola A.A., Abiona O.O., Adewusi A.O. and Oladapo O.J. A comprehensive review of leveraging cloud-native technologies for scalability and resilience in software development *International Journal of Science and Research Archive*, 2024, 11(02), 330–337. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.11.2.0432> .
13. Nova Fitness Co., Ltd. Laser PM2.5 Sensor: specification. Product model: SDS011 Nova Fitness Co., Ltd. 2015. URL: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf>
14. Панчук В. І., Панчук О. В., Ночвай В. І. Математична модель для прогнозування забруднення повітряного басейну міста. *Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: Збірник наукових праць*. 2006. С. 212–217
15. 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, вип. 2. С. 73-83. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2021-42-2-73-83>
16. Laquai, Bernd & Saur, Antonia.. Development of a Calibration Methodology for the SDS011 Low-Cost PM-Sensor with respect to Professional Reference Instrumentation. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/322628807_Development_of_a_Calibration_Methodology_for_the_SDS011_Low-Cost_PM-Sensor_with_respect_to_Professional_Reference_Instrumentation
17. Django introduction. Mozilla Developer Network (MDN). URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Server-side/Django/Introduction>
18. Mauri D., Coriani S., Hoffman A., Mishra A., Popovic J. Practical Azure SQL Database for Modern Developers: Building Applications in the Microsoft Cloud. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6370-9> .
19. Moruzzi, G. Tkinter Graphics. In: *Essential Python for the Physicist*. Springer, Cham. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45027-4_6

References

1. N. Svensson and Y. Andersson-Sköld, 'Dispersion and fate models for microplastics from tyre and road wear : state of the art and possibilities', *Statens väg- och transportforskningsinstitut*, Linköping, 2021. URL: <https://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:1616069/FULLTEXT01.pdf> [in English]
2. Fortuna M.V., Borisovskaya O.O. Assessment of water pollution by microplastics. *National Mining University. Collection of Scientific Papers*, Dnipro: NTU "Dniprovsk Polytechnic", 2021, No. 65, pp. 195-206. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.195> [in Ukrainian]
3. Jain R., Gaur A., Suravajhala R., Chauhan U., Pant P., Tripathi V., Pant G. Microplastic pollution: Understanding microbial degradation and strategies for pollutant reduction, *Science of The Total Environment*, Volume 905, 2023, 167098, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167098> [in English]
4. Wang Y., Zhang B., Zhang R., Wei Y., Wang Y., Zhu R. Microplastic Pollution Research Based on the VOS Viewer Software: Research Trends, Ecological Effects, and Testing Methods. *Atmosphere*. 2023; 14(5):838. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14050838> [in English]
5. Primpke S, Cross RK, Mintenig SM, et al. Toward the Systematic Identification of Microplastics in the Environment: Evaluation of a New Independent Software Tool (siMPle) for Spectroscopic Analysis. *Applied Spectroscopy*. 2020;74(9):1127-1138. DOI: <https://doi.org/10.1177/0003702820917760> [in English]
6. Massarelli C., Campanale C., Uricchio VF. A Handy Open-Source Application Based on Computer Vision and Machine Learning Algorithms to Count and Classify Microplastics. *Water*. 2021; 13(15):2104. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152104> [in English]
7. Josef Brandt, Karin Mattsson, and Martin Hassellöv. Deep Learning for Reconstructing Low-Quality FTIR and Raman Spectra—A Case Study in Microplastic Analyses, *Analytical Chemistry*, 2021, 93 (49), 16360-16368. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c02618> [in English]
8. Sturm MT., Myers E., Schober D., Korzin A., Schuhen K.. Development of an Inexpensive and Comparable Microplastic Detection Method Using Fluorescent Staining with Novel Nile Red Derivatives. *Analytica*. 2023; 4(1):27-44. DOI: <https://doi.org/10.3390/analytica4010004> [in English]
9. Ekrem Kursad Dal, Recai Kilic. Design and Implementation of a Microplastic Detection and Classification System Supported by Deep Learning Algorithm, 25 January 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3890356/v1> [in English]
10. Nyadjro, E.S., Webster, J.A.B., Boyer, T.P. et al. The NOAA NCEI marine microplastics database. *Sci Data* 10, 726 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02632-y> [in English]
11. Rauf, A.U., Sofiany, I.R., Fashani, Y., Al Naday, Q., Sulistiowati (2024). Application of Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) in Microplastic Studies Around Asia. In: Egbueri, J.C., Ighalo, J.O., Pande, C.B. (eds) *Microplastics in*

- African and Asian Environments. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-64253-1_25 [in English]
12. Oyeniran O.C., Modupe O.T., Otitoola A.A., Abiona O.O., Adewusi A.O. and Oladapo O.J. A comprehensive review of leveraging cloud-native technologies for scalability and resilience in software development *International Journal of Science and Research Archive*, 2024, 11(02), 330–337. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijra.2024.11.2.0432>. [in English]
13. Nova Fitness Co., Ltd. Laser PM2.5 Sensor: specification. Product model: SDS011 Nova Fitness Co., Ltd. 2015. URL: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf> [in English]
14. Panchuk V. I., Panchuk O. V., Nochvai V. I. Mathematical model for predicting air pollution in a city. *Modern problems of mathematical modeling, forecasting and optimization: Collection of scientific papers*. 2006. pp. 212–217. [in Ukrainian]
15. Dyvak M.P., Manzhula V.I., Melnyk A.M., Tymchyshyn V.S. Air pollution monitoring system by motor vehicles based on an autonomous aeromobile measuring complex. *Optical-electronic information and energy technologies*. 2022. 42 (2). P. 73-83. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2021-42-2-73-83> [in Ukrainian]
16. Laquai, Bernd & Saur, Antonia.. Development of a Calibration Methodology for the SDS011 Low-Cost PM-Sensor with respect to Professional Reference Instrumentation. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/322628807_Development_of_a_Calibration_Methodology_for_the_SDS011_Low-Cost_PM-Sensor_with_respect_to_Professional_Reference_Instrumentation [in English]
17. Django introduction. Mozilla Developer Network (MDN). URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Server-side/Django/Introduction> [in English]
18. Mauri D., Coriani S., Hoffman A., Mishra A., Popovic J. Practical Azure SQL Database for Modern Developers: Building Applications in the Microsoft Cloud. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6370-9> [in English]
19. Moruzzi, G. Tkinter Graphics. In: *Essential Python for the Physicist*. Springer, Cham. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45027-4_6 [in English]