

УДК 512.2

А.В. ПУКАС, І.Я. СПІВАК, Б.С. ТИМЧИШИН, Б.В. БРИЧ, В.В. МАНЖУЛА

ГІБРИДНА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Західноукраїнський національний університет, Україна

Анотація. У статті обґрунтовано та розроблено гібридну архітектуру системи інтеграції та обробки гетерогенних даних для задач екологічного моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища. Проаналізовано недоліки традиційних монолітних та файло-орієнтованих підходів при роботі з математичними моделями прогнозування поширення шкідливих викидів, які унеможливають гнучку автоматизацію екологічного моделювання. Для подолання проблеми форматної та семантичної гетерогенності вхідних даних запропоновано тривірневу гібридну модель зберігання даних. Вона ефективно поєднує як знання-орієнтовану технологію у вигляді доменної онтології, реляційну СУБД із просторовим розширенням для топологічних запитів та об'єктне файлове сховище для артефактів. Запропоновано програмну систему, яка базується на сервісно-орієнтованій архітектурі з використанням контейнеризації у середовищі Kubernetes. Розроблено спеціалізовані сервіси-адаптери, що забезпечили безшовну інтеграцію обчислювальних препроцесорів модуля прогнозування у сучасне розподілене веб-середовище. Здійснено практичну реалізацію рішень у програмній системі, яка автоматизує повний цикл обчислень і надає інтерактивний геопросторовий інтерфейс для візуалізації полів концентрацій забруднювачів. Запропонований підхід створює надійне науково-технічне підґрунтя для управління екологічними ризиками, зокрема і на урбанізованих територіях.

Ключові слова: математичне моделювання, гетерогенні дані, екологічне прогнозування, знання-орієнтована технологія, мікро-сервісна архітектура, навколишнє природне середовище

Abstract. The article substantiates and develops a hybrid architecture for a system of integration and processing of heterogeneous data for environmental modeling and state forecasting tasks. The drawbacks of traditional monolithic and file-oriented approaches in working with mathematical models for predicting the dispersion of harmful emissions, which make flexible automation of environmental modeling impossible, are analyzed. To overcome the problem of format and semantic heterogeneity of input data, a three-tier hybrid data storage model is proposed. It effectively combines knowledge-oriented technology in the form of a domain ontology, a relational DBMS with a spatial extension for topological queries, and an object file storage for artifacts. A software system based on a service-oriented architecture using containerization in the Kubernetes environment is proposed. Specialized adapter services have been developed, ensuring the seamless integration of the forecasting module's computational preprocessors into a modern distributed web environment. The practical implementation of the solutions is carried out in a software system that automates the full calculation cycle and provides an interactive geospatial interface for visualizing pollutant concentration fields. The proposed approach creates a solid scientific and technical foundation for managing environmental risks, particularly in urbanized territories.

Keywords: mathematical modeling, heterogeneous data, environmental forecasting, knowledge-oriented technology, microservice architecture, environment.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-287-301

ВСТУП

Забезпечення екологічної безпеки та управління антропогенним навантаженням в умовах сучасних викликів вимагає переходу від простої констатації фактів забруднення до проактивного управління [1, 2]. Ключовим інструментом такого управління є математичне та комп'ютерне моделювання процесів поширення шкідливих викидів в навколишньому середовищі.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Світовим стандартом у цій галузі є використання дисперсійної моделі AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model), яка здатна з високою точністю враховувати складний рельєф, міську забудову та локальні метеорологічні умови [3, 4, 5]. Попри потужну математичну базу AERMOD, практичне застосування цього комплексу для завдань оперативного управління стикається зі значними архітектурними та технологічними перешкодами. Здійснений нами критичний огляд існуючих на ринку програмних засобів (зокрема AERMOD View, BREEZE AERMOD, SCREEN View) виявив певний технологічний розрив [6, 7, 8, 9]. Більшість існуючих пакетів є монолітними десктопними додатками, які орієнтовані виключно на статичний проектний аналіз та передбачають значну частку ручного введення параметрів. Вони не мають відкритих API для інтеграції із зовнішніми інформаційними ресурсами (наприклад, міськими IoT-мережами чи онлайн-метеостанціями) та концептуально не підтримують автоматизований цикл «вхідні дані – моделювання – рішення». Крім того, побудова автоматизованих систем моделювання неминуче стикається з фундаментальною проблемою гетерогенності вхідних даних. Для коректного розрахунку необхідно інтегрувати розрізнені масиви: метеорологічні спостереження, цифрові моделі рельєфу просторових ГІС-форматів, векторні дані міської забудови та корпоративні кадастри джерел викидів. Традиційні файло-орієнтовані або виключно реляційні підходи до зберігання таких даних виявляються семантично бідними. Вони створюють ізольовані інформаційні сховища, які вимагають ручної синхронізації та унеможливають гнучку автоматизацію сценарного моделювання та прогнозування стану навколишнього природного середовища [10].

Зважаючи на виявлені недоліки існуючих підходів, метою даної роботи є розробка гібридної архітектури системи інтеграції та обробки даних для задач екологічного моделювання. Запропонований підхід має подолати проблему форматної та семантичної гетерогенності шляхом поєднання мікро-сервісної архітектури, геопросторових баз даних та знання-орієнтованої технології, забезпечивши тим самим надійне підґрунтя для автоматизації процесів екологічного моделювання навколишнього середовища.

1. СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМПЛЕКСУ AERMOD ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ

Для реалізації функцій моделювання розсіювання викидів в системі використовується комплекс AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model). Архітектурно цей комплекс являє собою систему взаємопов'язаних модулів (препроцесорів та основного процесора), які працюють послідовно (рис. 1). Така модульність дозволяє гнучко налаштовувати процес моделювання, розділяючи обробку метеоданих, географічних даних та безпосередньо розрахунок концентрацій [4].

Структурна схема комплексу включає три основні компоненти:

1. Метеорологічний препроцесор AERMET. Призначення – підготовка та адаптація «сирих» метеорологічних даних для використання в дисперсійній моделі. AERMET обробляє погодинні дані приземних спостережень та дані вертикального зондування атмосфери. Ключовою особливістю є те, що він не просто форматує дані, а розраховує параметри турбулентності планетарного пограничного шару (ППШ), які не вимірюються напряму.

Фундаментальною відмінністю AERMOD від застарілих методик є використання теорії подібності для опису структури приземного шару атмосфери. Замість дискретних класів стійкості Пасквілла-Гіффорда, модель оперує безперервними параметрами турбулентності [4].

Модуль формує два вихідні файли: файл опису поверхні (.sfc) та профільний файл (.pfl), які слугують вхідними даними для ядра AERMOD.

2. Географічний препроцесор AERMAP. Призначення, якого обробка даних про рельєф місцевості та генерація координат рецепторів (точок розрахунку). Оскільки поширення домішок у місті залежить від рельєфу (обтікання пагорбів, застійні зони в низинах), AERMAP аналізує цифрові моделі рельєфу (DEM – Digital Elevation Model). Для кожного рецептора він розраховує не лише його висоту над рівнем моря, а й так звану «шкалу висоти пагорба». Це дозволяє основній моделі визначати, чи буде шлейф викидів огинати перешкоду, чи перелетить через неї (концепція розділення лінії току).

3. BPIP PRIME (Building Profile Input Program) [11]. Для умов міської забудови критично важливим є модуль BPIP PRIME. Він розраховує ефект аеродинамічної тіні. Високі будівлі поблизу джерел викидів (труб котельень) створюють турбулентність, яка може «притиснути» шлейф диму до землі одразу за будівлею, створюючи зони екстремально високої концентрації. Ігнорування цього ефекту в місті призводить до грубих помилок.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

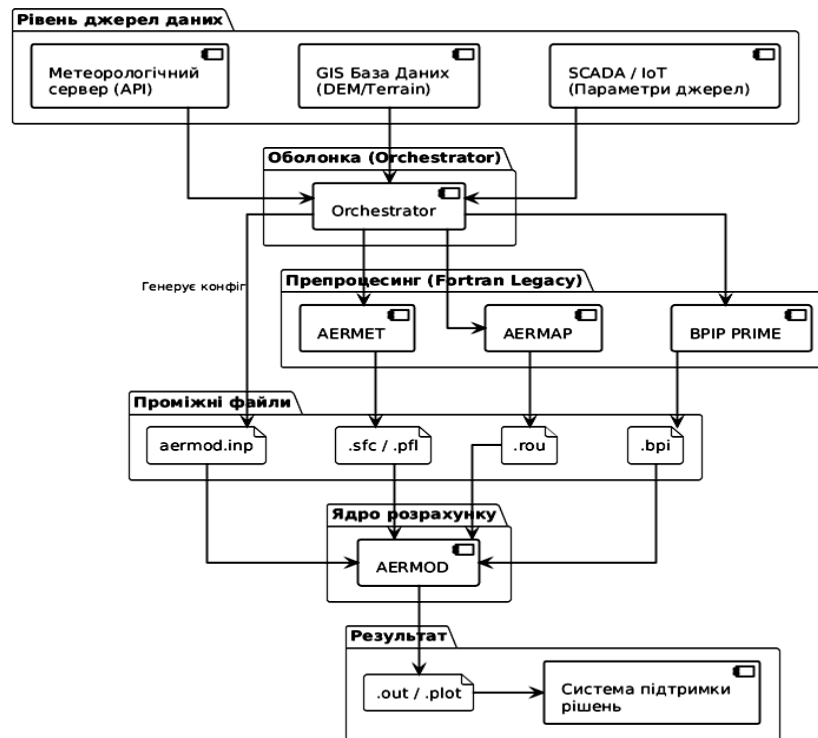


Рисунок 1 – Архітектура обчислювальних модулів AERMOD

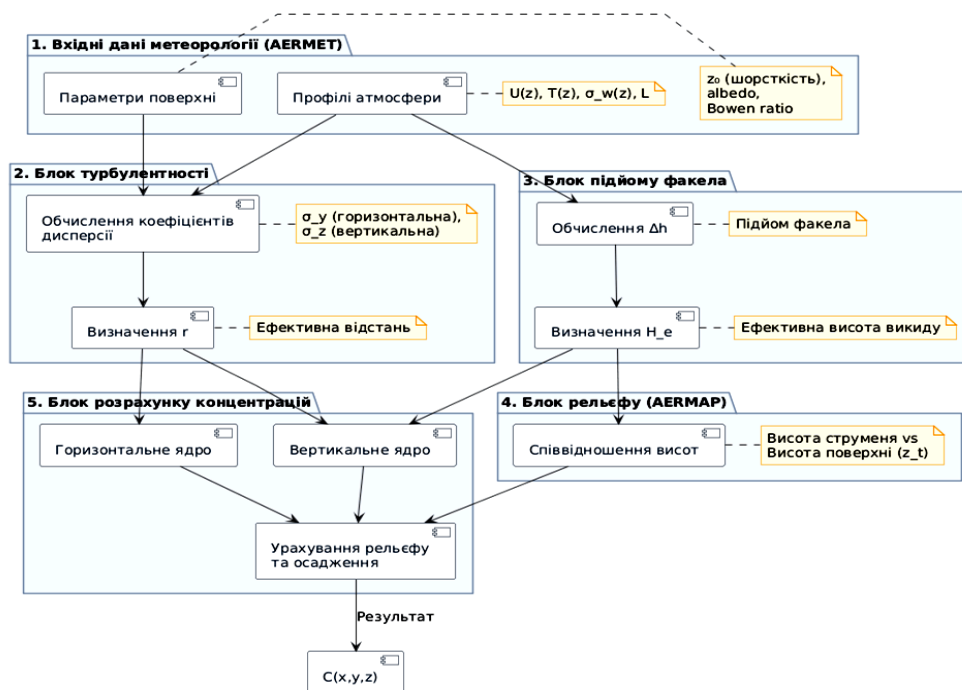


Рисунок 2 – Структурна схема математичних блоків AERMOD

4. Центральний обчислювальний модуль AERMOD здійснює безпосередній розрахунок концентрації забруднюючих речовин. Це ядро системи, яке об'єднує дані від AERMET, AERMAP та параметри джерел викидів. AERMOD використовує гібридний підхід: у стабільних умовах (ніч, інверсія) використовується гаусовий розподіл по вертикалі та горизонталі, у конвективних умовах (сонячний день) використовується бі-гаусовий розподіл для вертикальної компоненти, що дозволяє моделювати ефект відбиття шлейфу від землі та верхньої межі шару перемішування.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Використання AERMOD як компонента (Backend) програмної системи має низку специфічних особливостей, які необхідно врахувати при проектуванні ПЗ:

1. Файловий інтерфейс керування. AERMOD не має API у звичному розумінні (DLL або бібліотеки класів). Керування здійснюється через текстовий файл конфігурації aermod.inp. Необхідна автоматична генерація файлу aermod.inp на основі обраного сценарію моделювання. Система повинна динамічно змінювати параметри джерел та рецепторів, підставляючи нові значення, не впливаючи на блоки метеорології та рецепторів;

2. Обробка результатів. AERMOD генерує вихідні файли у текстовому форматі (звіти) або двійковому форматі. Для прийняття управлінських рішень системі не потрібен весь масив даних. Необхідно розробити парсер, який зчитує матрицю концентрацій, знаходить локальні максимуми та порівнює їх з ГДК. Час роботи моделі залежить від кількості рецепторів. Для оперативного управління («що буде через годину?») доцільно використовувати не повну сітку міста, а набір «контрольних точок у найбільш вразливих зонах, що скорочує час розрахунку з хвилин до секунд.

3. Вимоги до циклічності. Програмна система працює в режимі ковзного горизонту. AERMOD розроблений для розрахунку статистичних періодів (рік, місяць). Для проактивного управління необхідно запускати модель у режимі короткострокового прогнозу (наприклад, на 24 години вперед), щоразу оновлюючи вхідний метеофайл прогнозними даними. Це вимагає розробки скриптів автоматизації, які керують життєвим циклом запуску модулів: Weather API -> AERMET -> AERMOD -> Decision Parsing.

4. Врахування фонових забруднень. AERMOD моделює лише внесок конкретних джерел, закладених у модель. Для коректної оцінки загальної екологічної ситуації інтелектуалізована система повинна додавати до результатів AERMOD значення фонових концентрацій (від транспорту та інших неврахованих джерел), яке може прогнозуватися окремим модулем.

Структурна декомпозиція AERMOD на незалежні модулі дозволяє ефективно інтегрувати його в сучасні програмні архітектури. Використання BPIP PRIME та AERMAP забезпечує необхідну точність для урбанізованого ландшафту, а текстовий інтерфейс вводу-виводу дозволяє легко автоматизувати процес сценарного моделювання.

ГІБРИДНА АРХІТЕКТУРА ІНТЕГРАЦІЇ ВХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Проведений аналіз показує, що традиційні підходи до зберігання даних (файли, реляційні БД) є семантично бідними, негнучкими та нездатними ефективно моделювати складні, гетерогенні сутності навколишнього середовища, що унеможливує автоматизацію сценарного моделювання. Оскільки, ефективність та достовірність будь-якої програмної системи безпосередньо залежить не лише від обчислювальних алгоритмів, але й від якості, повноти та семантичної узгодженості вхідних даних. Створення «єдиного джерела істини» є однією із умов такої ефективності, але його реалізація стикається з фундаментальною проблемою гетерогенності даних. Ця проблема має три основні виміри:

- гетерогенність екосистеми обчислювального модуля;
- гетерогенність джерел та форматів даних;
- гетерогенність семантики.

Обраний нами обчислювальний модуль для моделювання, AERMOD, не є монолітним застосунком. Це екосистема з кількох окремих програм (препроцесорів), кожна з яких вимагає власних, унікальних за типом та форматом вхідних даних. Зокрема, метеорологічний препроцесор AERMET вимагає сирих погодинних поверхневих даних та даних аерологічного зондування у специфічних текстових форматах (.dat), а на виході генерує власні бінарні файли (.SFC, .PFL). В свою чергу, препроцесор рельєфу AERMAP вимагає цифрових моделей рельєфу (DEM), зазвичай у растрових ГІС-форматах (напр., GeoTIFF). Також, препроцесор забудови BPIP PRM вимагає векторних даних про контури та висоту будівель (напр., Shapefile, CSV, DWG). Основний обчислювальний модуль AERMOD вимагає результати роботи всіх цих препроцесорів, а також детальний опис джерел та рецепторів у власному, строгому позиційному текстовому форматі .INP.

Гетерогенність джерел та форматів даних обумовлюється тим, що дані надходять з абсолютно різних, не пов'язаних між собою джерел: дані про рельєф – з Держгеокадастру, метеорологічні дані – з Держгідромету, дані про забудову – з місцевого управління архітектури або таких зовнішніх ресурсів, як OpenStreetMap, а кадастр джерел – з файлів самого підприємства (напр., CSV або Excel). Як наслідок,

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

система має одночасно оперувати щонайменше п'ятьма різними форматами даних: текстовими файлами, бінарними файлами, растровими ГІС-даними, векторними ГІС-даними та таблицями.

Ключовою проблемою є гетерогенність семантики. Це найглибша проблема, оскільки, традиційні підходи до зберігання даних (файли або реляційні БД) фіксують дані, але не їхнє значення.

Файло-орієнтований підхід (традиційна практика екологів) є недосконалим та невідтворюваним. Він покладається на те, що інженер вручну коректно збереже всі файли у потрібних теках, правильно їх назве та без помилок впише шляхи до них у головний керуючий файл. Будь-яка зміна (напр., оновлення метео-файлу) вимагає ручного редагування, що є джерелом помилок (рисунок 3).

Реляційний підхід (напр., SQL-база даних) вирішує проблему структурованого зберігання, але страждає від семантичної бідності та жорсткості схеми. Наприклад, база даних «знає», що в таблиці boilers є колонка stack_height типу decimal(8,2). В той же час, вона не «розуміє», що це та сама сутність, яку AERMOD називає STKNEI, а онтологія SWEET – PhysicalProperty [12, 13]. Вона не може логічно перевірити, що BoilerHouse (котельня) повинна мати цей параметр, а AreaSource (площинне джерело) – ні. Ця логіка закладається в код застосунку, роблячи саму базу даних «пасивною».

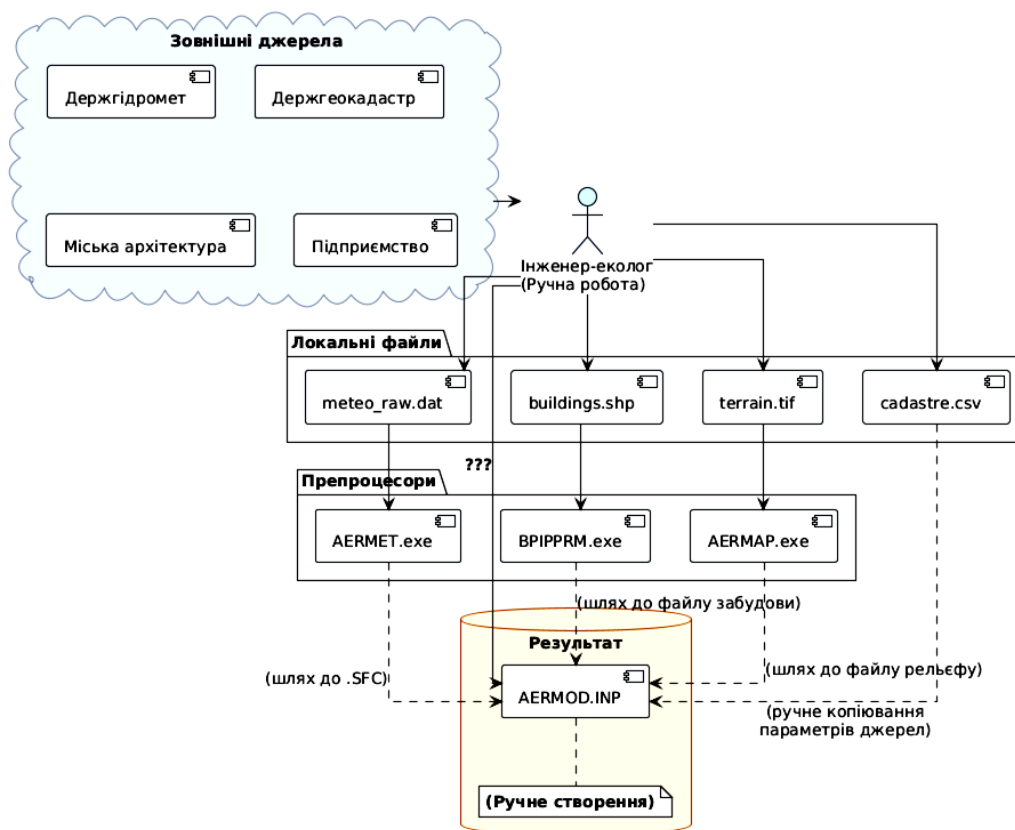


Рисунок 3 – Проблема гетерогенності даних в традиційному підході

Для подолання цих проблем та реалізації гнучкої, програмної системи її інформаційне забезпечення повинно відповідати наступним вимогам:

- семантична виразність. Модель даних повинна зберігати не лише значення (30.0), але й знання («Висота труби» є «Фізичною властивістю»);
- логічна валідація. Модель повинна мати вбудовані механізми перевірки несуперечливості (напр., «Джерело не може бути одночасно і точковим і поверхневим»);
- інтероперабельність. Модель повинна використовувати загальновизнані стандарти (напр., W3C, OGC) для легкої інтеграції з іншими міськими системами (транспорт, містобудування тощо);

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

- гнучкість та розширюваність. Модель повинна дозволити легке додавання нових типів джерел (напр., EcoTransport) без необхідності руйнування існуючої структури.

Традиційні файло-орієнтовані та реляційні підходи не задовольняють цим вимогам. Вони створюють семантично розрізнені «набори» даних. Для створення справді інтегрованої системи, здатної автоматизувати складні робочі процеси (рис. 3), необхідний перехід до моделі, що керується знаннями. Це обґрунтовує розробку доменної онтології як центрального семантичного інтеграційного хабу [14].

Для вирішення фундаментальної проблеми гетерогенності даних та створення надійного «єдиного джерела істини», була розроблена спеціалізована архітектурна схема збору та інтеграції, представлена на рисунку 4. Ця архітектура базується на двох ключових принципах: інкапсуляції (через препроцесорні сервіси) та централізації семантики (через онтологічний хабу).

Верхній рівень («Зовнішні джерела») представляє різноманітне середовище вхідних даних у їхніх «сирих» форматах (CSV, API, файли DEM, Shapefile, метеорологічні .dat файли). Пряма взаємодія ядра системи з цим середовищем призвела б до вразливості та надзвичайної складності коду.

Для запобігання цьому введено проміжний шар – «Препроцесорні Сервіси (ETL)». Кожен сервіс у цьому шарі є незалежним мікросервісом-адаптером, який реалізує принцип інкапсуляції: він приховує всю складність роботи з одним конкретним типом гетерогенних даних і надає єдиний, стандартизований інтерфейс для ядра системи.

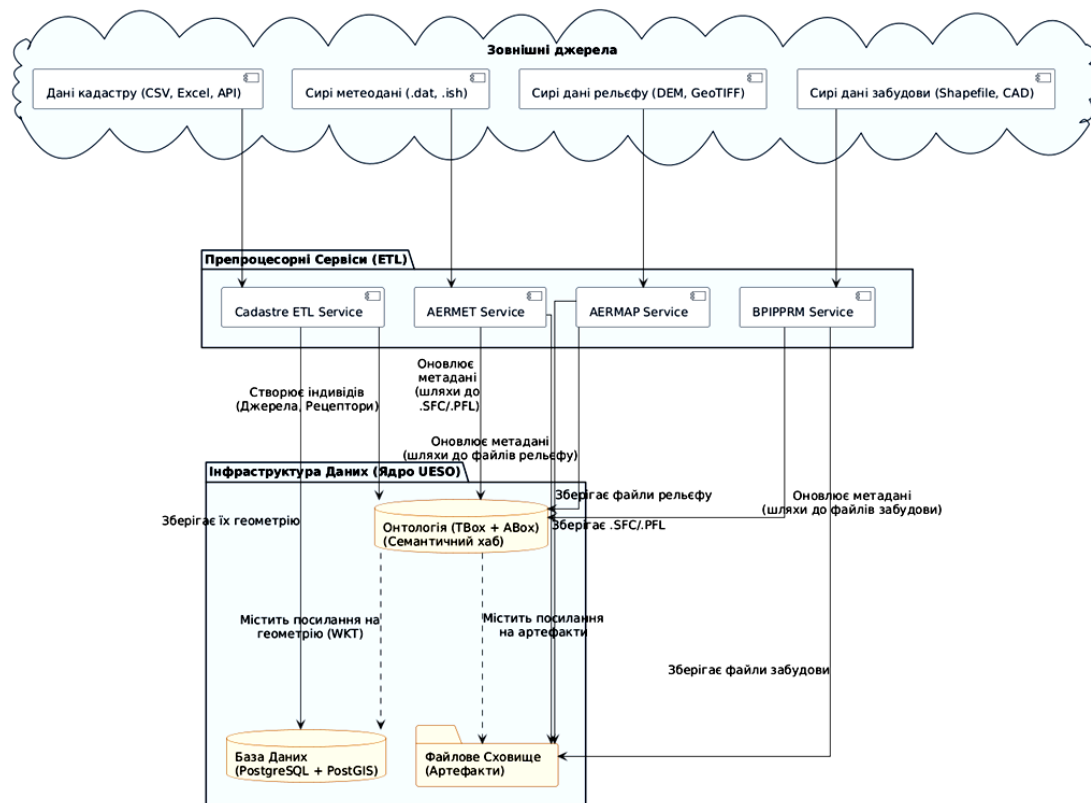


Рисунок 4 – Архітектурна схема збору та інтеграції гетерогенних даних

AERMET Service спеціалізується на обробці «сирих» метеорологічних даних. Він автоматично завантажує їх, запускає обчислювальне ядро AERMET.exe і зберігає результуючі бінарні артефакти (.SFC/.PFL). AERMAP Service та BPIPPRM Service виконують аналогічні функції для даних рельєфу та забудови, запускаючи відповідні препроцесори. Cadastre ETL Service відповідає за найскладнішу частину – перетворення бізнес-даних (напр., з Excel-таблиць) у формалізовані об'єкти системи.

Нижній рівень («Інфраструктура Даних») реалізує «єдине джерело істини».

Аналіз повного спектру даних, необхідних для функціонування програмної системи (від «сирих» метеорологічних файлів до семантики управлінських рішень), показує, що жодна монолітна технологія зберігання не здатна ефективно впоратися з усіма трьома викликами: семантичною складністю,

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

геопросторовими запитами та зберіганням «важких» артефактів. На перший погляд, реляційна СУБД з розширенням PostGIS чудово зберігає структуровані дані (списки котелень) і є світовим стандартом для високопродуктивних геопросторових запитів. Однак для нашої задачі вона має фундаментальні недоліки: семантична бідність та відсутність логічного виведення. Також жорсткість схеми утруднює додавання нового типу джерела (напр., EcoNoise для шумового забруднення) або нової складної управлінської сутності та вимагатиме складної та ризикованої міграції всієї схеми бази даних, що робить систему складною в розвитку.

Онтологія вирішує всі семантичні проблеми реляційної БД, оскільки вона гнучка, підтримує логічне виведення і чудово моделює складні зв'язки (як у сценаріях). Однак вона має недоліки у двох інших важливих аспектах [15, 16]:

- неефективність зберігання «важких артефактів». Онтологія призначена для зберігання знань, а не файлів. Спроба «зберегти» 1-річний метеорологічний файл .SFC (сотні мегабайт) або растровий файл рельєфу GeoTIFF (гігабайти) безпосередньо в онтологію у вигляді xsd:base64Binary літералу є технічно неможливою або призведе до деградації продуктивності всієї бази знань.

- низька продуктивність складних геопросторових запитів. Хоча стандарт GeoSPARQL існує для онтологій, він своєю потужністю та швидкістю поступається оптимізованим R-tree індексам PostGIS. Виконати запит «знайти всі котельні в межах полігону *D* зі складною геометрією» засобами GeoSPARQL буде на порядки повільніше, ніж аналогічний запит у PostGIS.

Тому було обрано гібридну модель зберігання, що складається з трьох компонентів:

- файлове сховище (Артефакти) – великі, часто бінарні файли, які неможливо або недоцільно зберігати в базі даних (напр., багаторічні метеофайли .sfc або .pfl, оброблені файли рельєфу);

- база даних (наприклад, PostgreSQL + PostGIS) – високопродуктивна база даних для зберігання специфічних даних, які потребують оптимізованої обробки. В першу чергу, це геопросторові дані (геометрія у форматі WKT/WKB), для яких PostGIS надає потужні інструменти індексації та просторових запитів.

- онтологія – семантичний хаб всієї інфраструктури. Це не просто сховище даних, а сховище знань. Онтологія UESO має зберігати усі класи та властивості, а також, усі індивіди та їхні атрибути [12].

Найголовніше – онтологія пов'язує всі компоненти в єдине ціле. Як показано на схемі, індивід в онтології містить посилання на геометрію (WKT) (яке вказує на відповідний запис у PostGIS) та посилання на артефакти (яке вказує на відповідний файл у файловому сховищі).

Схема ілюструє два типи потоків, ініційованих ETL-сервісами:

- потік даних – Cadastre ETL Service має створювати індивіди в онтології та одночасно зберігати їхню геометрію в PostGIS;

- потік артефактів та метаданих – AERMET Service розміщує файл .sfc у файлове сховище, а потім лише оновлює метадані в онтології (напр., для індивіда MeteoData_2025 встановлює властивість hasSfcFilePath = 'path/to/file.sfc').

Таким чином, будь-який інший сервіс системи повністю ізольований від хаосу зовнішніх даних. Достатньо зробити один семантичний запит (SPARQL) до онтології і вона поверне йому повний, валідований набір даних, включаючи всі необхідні посилання та файли-артефакти.

Отже, така гібридна архітектура дозволяє системі одночасно бути семантично багатою (завдяки онтології), здатною зберігати великі артефакти, завдяки файловому сховищу, та високопродуктивною у геопросторових запитах (завдяки PostGIS). В свою чергу, препроцесорні сервіси (ETL) інкапсулюють складність розподілу цих даних, а обчислювальні сервіси отримують всі необхідні посилання через один простий SPARQL-запит до онтології, яка виступає центральним інтеграційним хабом.

ПРОГРАМНА СИСТЕМА ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Запропонована архітектура дозволяє інкапсулювати складність препроцесингу та обчислень, надаючи користувачеві простий та потужний інструмент для інтерактивного прогностичного моделювання [17]. На рисунку 5 представлена діаграма послідовності побудови й реалізації сценарію моделювання. Ця діаграма відображає етапи створення сценаріїв, інтеграцію даних та застосування моделей для прогнозування та аналізу.

Послідовність дій відображає взаємодію користувача з веб-інтерфейсом, сервісом сценаріїв моделювання (ScenarioService), онтологічною підсистемою (OntologyService), модулем логічної валідації

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

(ValidationEngine), препроцесорами AERMET/ВPIPPRM, функцією трансляції для побудови керуючого файлу aermod.inp, обчислювальним ядром AERMOD та сервісом збереження результатів (ResultService).

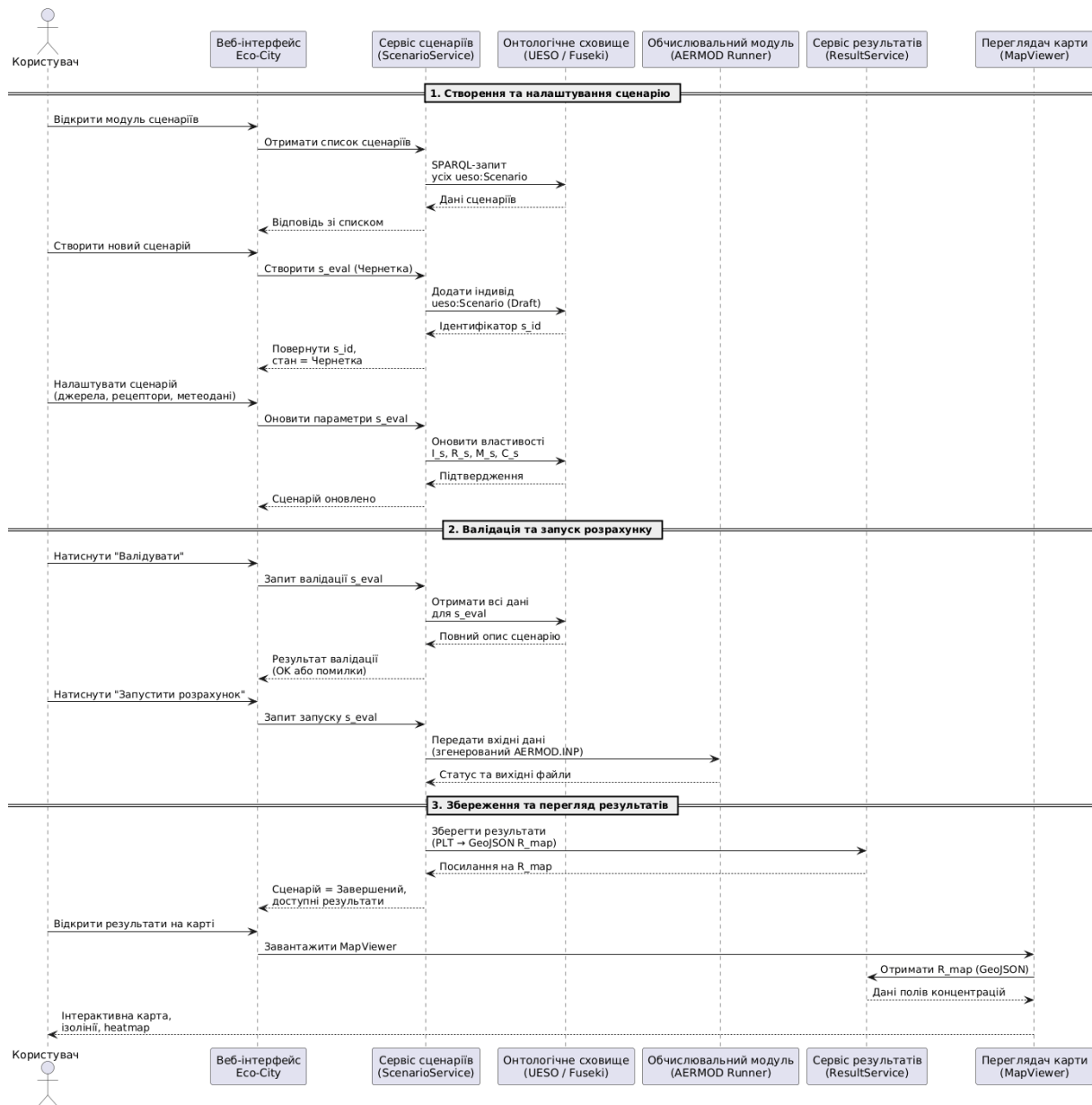


Рисунок 5 – Діаграма послідовності побудови й реалізації сценарію

Важливим є те, що кожен етап – налаштування сценарію, валідація, запуск розрахунку, генерація вихідних карт концентрацій – формалізовано як окремий крок послідовності, при цьому система завжди працює з онтологічним поданням даних, а не з неструктурованими файлами. Це забезпечує відтворюваність, автоматизовану перевірку повноти даних та можливість повторного запуску сценаріїв із мінімальними витратами на підготовку вхідних даних.

На діаграмі класів предметної області програмної системи Eco-City показано основні сутності, що відображають структуру онтології UESO [14] та сценарно-орієнтовану модель моделювання (рисунок 6). Базовим поняттям є клас EmissionSource, який має спеціалізації BoilerHouse, CogenerationUnit, AreaSource та VolumeSource, що відповідають гетерогенним типам джерел викидів у навколишньому середовищі. Кожне джерело асоційоване з набором об'єктів класу Emission, які описують інтенсивність викидів конкретних поліюгантів (Pollutant), їх часові профілі та інші параметри. Просторовий аспект моделі представлено класами ReceptorPoint, Building та AvailableSite, які задають точки спостереження,

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

об'єкти забудови та потенційні локації для розміщення нових джерел.

Класи Scenario, EvalScenario та OptScenario формалізують сценарний підхід до моделювання, де кожен сценарій пов'язаний із множиною джерел, рецепторів та метеорологічним набором (MeteoSet), а також має стан життєвого циклу. Результати моделювання представлені графом класів ResultMap, ScenarioDelta та ParetoFront, які підтримують як оцінювальний, так і оптимізаційний аналіз (у тому числі побудову Парето-фронтів). Така структуризація забезпечує безпосередню відповідність між онтологічною моделлю UESO, сценарними структурами та програмною реалізацією системи Eco-City.

Реалізація системи Eco-City ґрунтується на концептуальному поєднанні мікросервісної архітектури та семантичної моделі предметної області, що задається онтологією UESO (Urban Emission Source Ontology). Такий підхід дозволяє відокремити логіку моделювання процесів розсіювання забруднювачів від структур даних і способів їх зберігання, забезпечуючи незалежну еволюцію окремих модулів і, водночас, цілісність їхнього змістового представлення. Система будується навколо принципу слабого зв'язування компонентів, коли кожен функціональний блок (робота зі сценаріями, управління джерелами та рецепторами, моделювання AERMOD, оброблення метеорологічних даних, оптимізація, візуалізація) є самостійною сервісною одиницею. Комунікація між сервісами виконується через стандартизовані протоколи REST/HTTP та структури даних JSON, RDF і GeoJSON, що спрощує масштабування та розподілене виконання обчислень.

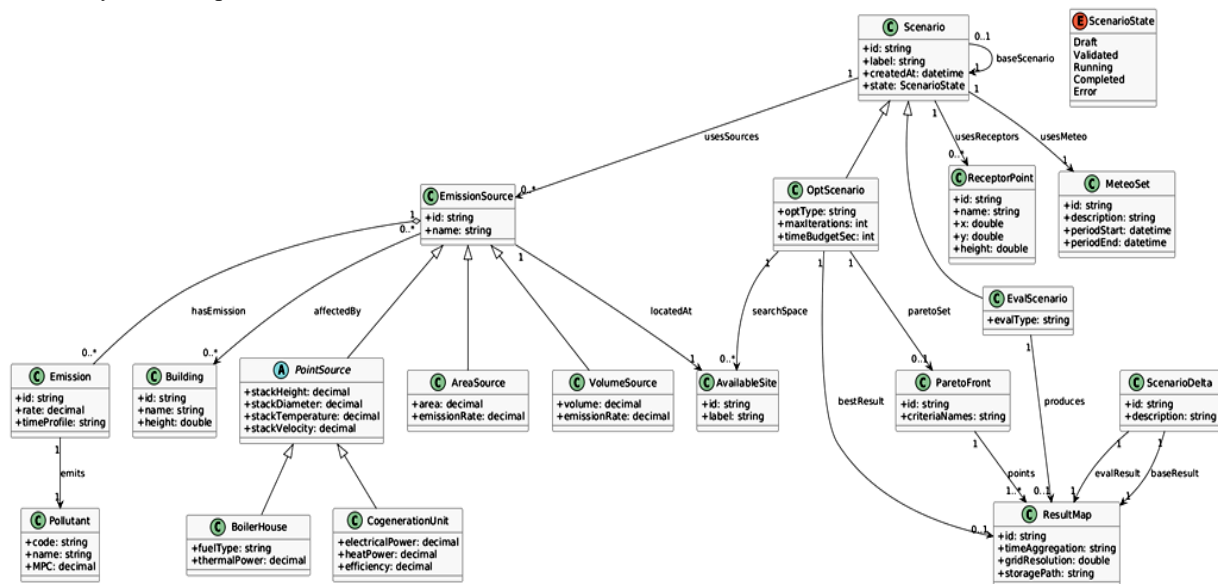


Рисунок 6 – Діаграма основних класів системи Eco-City

Усі сервіси розгортаються в інфраструктурі Kubernetes, де вони отримують окремі контейнерні середовища виконання, незалежні політики масштабування, горизонтальні балансувальники навантаження та централізований контроль їхнього стану.

Важливою передумовою такої архітектури є визначення чіткої ролі онтологічного шару, який виступає єдиним джерелом істини щодо структури даних, логічних зв'язків та критеріїв валідності предметної області. Завдяки цьому програмні модулі системи зосереджуються не на дублюванні логіки валідації чи трансформації даних, а на виконанні спеціалізованих функцій, використовуючи уніфіковану семантичну основу. Семантичний рівень базується на онтології UESO, реалізованій у формальному форматі OWL2DL і розгорнутій у triple-store-сховищі Apache Jena Fuseki. Онтологія містить формальні визначення типів джерел викидів, рецепторів, просторових характеристик, параметрів моделей AERMOD, метаданих метеорологічних спостережень та сценаріїв моделювання. Таким чином, UESO виступає не просто сховищем структурованих фактів, а повноцінним механізмом контролю семантичної коректності даних у системі. Будь-який сервіс Eco-City, який взаємодіє з даними, отримує їх уже у валідованому вигляді, що радикально знижує ризик логічних помилок у моделюванні.

Геопросторові дані відіграють ключову роль у моделюванні процесу розсіювання забруднювачів. Використання стандарту GeoSPARQL дозволяє зберігати геометрію джерел і рецепторів у форматі WKT, виконувати топологічні запити (перетини, включення, відстані) та автоматично інтегрувати їх із картографічними інструментами. У цьому контексті Eco-City реалізує одночасно два

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

підходи: геометрію для AERMOD зберігається у строгому семантичному форматі RDF/GeoSPARQL та візуалізація здійснюється через перетворення цих геометрій у GeoJSON.

Це забезпечує єдину логічну основу для всіх модулів системи. На рисунку 7 представлено діаграму розгортання системи. На діаграмі розгортання відображено ключові компоненти програмно-апаратної інфраструктури системи Eco-City, які у своїй сукупності формують архітектуру високої складності, орієнтовану на виконання ресурсоємних обчислювальних завдань, забезпечення логічної цілісності даних та підтримку масштабованого сценарного аналізу. У верхньому рівні інфраструктури знаходиться клієнтський пристрій користувача, який взаємодіє з системою через веб-браузер. Саме браузер забезпечує доступ до багатосторінкового веб-застосунку, що включає інструменти створення сценаріїв, управління джерелами та рецепторами, перегляду результатів моделювання та роботи з онтологічною підсистемою.

Комунікація між клієнтом та внутрішніми компонентами системи здійснюється через публічний сегмент мережі (DMZ), де розгорнуто веб-сервер Nginx та API-шлюз, який виконує маршрутизацію запитів до відповідних мікросервісів. Наявність DMZ-домену є важливим елементом безпеки: він дозволяє ізолювати зовнішні запити від внутрішньої логіки, а також забезпечує кешування статичних ресурсів, обмеження швидкості запитів, захист від DDoS-атак та централізовану обробку HTTPS-трафіку.

Основна обчислювальна логіка розгорнута в кластері Kubernetes, що є ключовим елементом складності системи, оскільки забезпечує автоматичне створення, масштабування, відновлення та оновлення мікросервісів. Кожен сервіс (ScenarioService, SourceCatalogService, ReceptorService, EcoModel, EcoOptimizer та ін.) працює в окремому контейнері, ізолюваному на рівні операційної системи. Така архітектура дозволяє системі ефективно розподіляти навантаження, виконувати паралельні моделювальні експерименти та підтримувати одночасну роботу великої кількості сценаріїв моделювання.

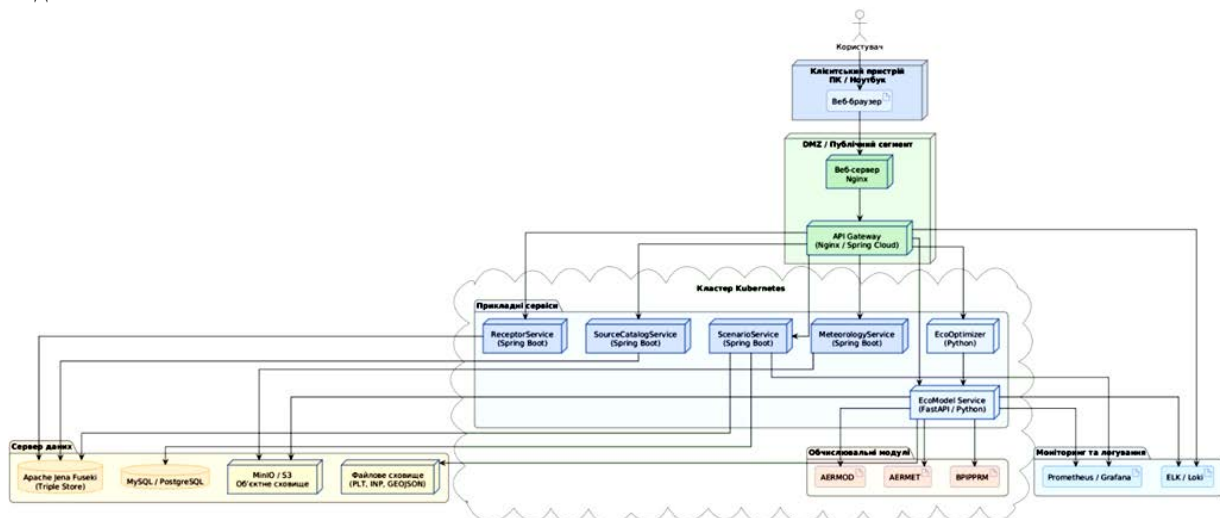


Рисунок 7 – Діаграма розгортання системи

Особливої уваги потребують обчислювальні утиліти AERMOD, AERMET та BPIPPRM. Вони не створювались як частина хмарних або контейнеризованих екосистем, тому їхня інтеграція в Kubernetes вимагає спеціального обгортання (wrapper-сервісів) і механізмів контролю ресурсів. Зокрема, AERMOD є високонавантаженим обчислювальним модулем, чутливим до переривань та зміни середовища виконання. Для забезпечення стабільності функціонування його запуск реалізується у відокремлених pod-екземплярах, які отримують гарантовані ресурси (CPU/Memory Requests & Limits), а результати його роботи зберігаються у стійких томах (Persistent Volume Claims). Таке рішення дозволяє уникати повторних обчислень та втрати даних при перезапуску сервісів, що є типовою проблемою хмарних розгортань.

Сервер даних представлений тривірневою підсистемою зберігання, яка реалізує структуру різних типів навантажень:

– онтологічне triple-store (Apache Jena Fuseki) відповідає за семантичне представлення даних та виконання SPARQL-запитів;

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

– реляційна база даних (MySQL) забезпечує транзакційну цілісність службових і системних даних;

– об'єктне файлове сховище MinIO використовується для зберігання великих результатів моделювання, файлів AERMOD, метеоданих та GeoJSON-артефактів.

Така гетерогенність зберігання даних визначає складність програмної реалізації: кожен тип даних має власні вимоги щодо форматів обміну, протоколів взаємодії, транзакційних властивостей, а також окремі механізми масштабування. Наприклад, SPARQL-запити до Fuseki мають інший профіль навантаження, ніж SQL-запити до реляційної бази, що вимагає різних стратегій кешування та балансування.

Для забезпечення відмовостійкості та нагляду за працездатністю системи у структурі передбачено окремий сервер моніторингу та логування, який збирає метрики з усіх мікросервісів, кластерних вузлів та інфраструктурних компонентів. Використання Prometheus та Grafana дозволяє відслідковувати продуктивність моделі, завантаженість CPU і пам'яті, затримки запитів, час виконання AERMOD та інші параметри в реальному часі. Журнали подій зберігаються в централізованій системі логування (ELK або Loki), що забезпечує їхню доступність для аудиту, аналізу помилок і діагностики взаємодії між сервісами. Наявність такого рівня моніторингу є необхідною умовою функціонування складної розподіленої системи, яка має підтримувати високу надійність і бути здатною до автономного відновлення.

Логічна структура інтерфейсу відображає природний перебіг роботи аналітика екологічної служби або міського планувальника. Система відкривається головною сторінкою, де користувач отримує стислу інформацію про доступні сценарії, поточний стан підсистем, журнали останніх обчислень та можливості створення нового дослідницького експерименту. Перехід до модуля сценаріїв дозволяє сформувати структуру майбутнього моделювання. Користувач не лише обирає джерела та рецептори – інтерфейс забезпечує глибшу інтеграцію з онтологічною моделлю UESO, автоматично підказуючи відповідні типи об'єктів, контролюючи їхню семантичну сумісність та запобігаючи помилкам у формуванні вхідних параметрів. Такий підхід переводить інтерфейс із рівня «інструменту для введення даних» у рівень «інтелектуального асистента», який забезпечує відповідність дій користувача структурі знань предметної області.

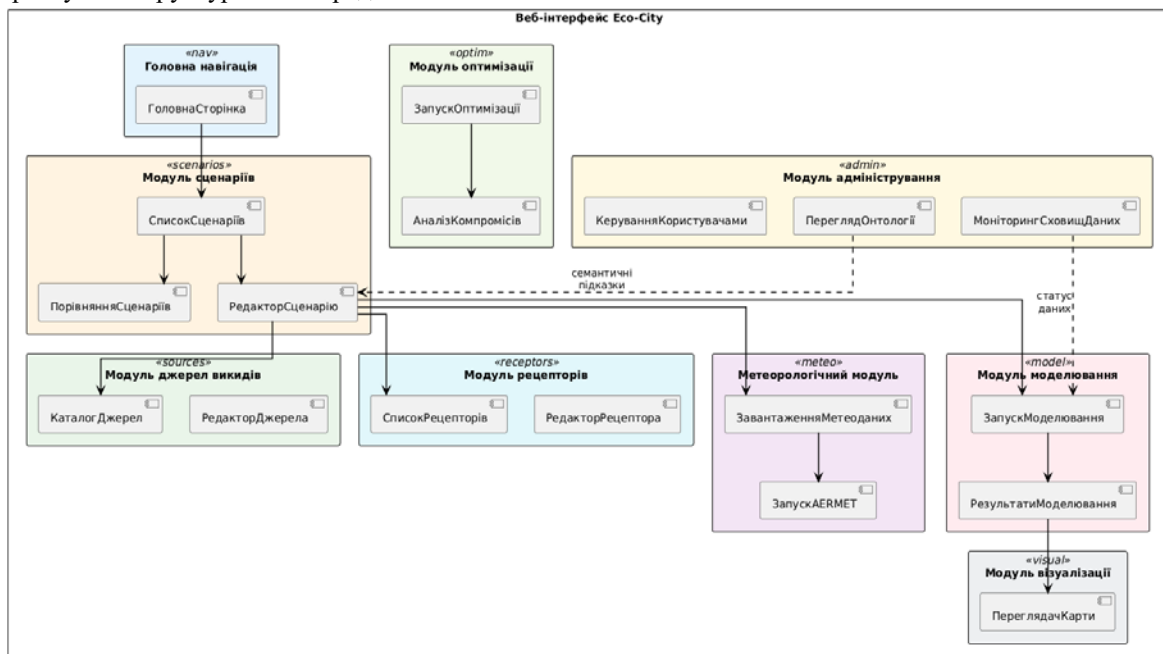


Рисунок 8 – Загальна схему взаємодії програмних модулів в рамках організації графічного інтерфейсу користувача системи

Підготовка метеорологічних даних та їх перетворення у формат, придатний для AERMOD, традиційно є складною процедурою, що вимагає окремих утиліт. Система інкапсулює цю складність, розміщуючи весь цикл обробки на присвяченій сторінці. Користувач бачить процеси AERMET не як

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

набір команд чи консольних операцій, а як структурований робочий етап із документуванням створених файлів, відображенням статусів та журналів. Завдяки цьому формування метеорологічних артефактів стає не лише прозорим, а й контрольованим у межах одного інтерфейсу.

Однією з найважливіших сторінок системи є модуль візуалізації. Модуль поєднує картографічне відображення, графіки та табличні зрізи таким чином, щоб користувач міг аналізувати результати моделювання комплексно. Карта дозволяє ідентифікувати просторові аномалії, графіки – дослідити часову динаміку або сезонні коливання, а таблиці – отримати точні значення, необхідні для звітів чи нормативних оцінок. Усі ці форми представлення даних пов'язані між собою: зміна параметрів карти одразу оновлює таблиці, а вибір окремої точки рецептора в таблиці синхронно позначає її на карті.

Організація графічного інтерфейсу системи Eco-City не обмежується формальним розподілом функцій між сторінками. Її основу становить когнітивний дизайн, орієнтований на те, яким чином фахівці екологічних служб, містобудівники та аналітики сприймають інформацію, формують ментальні моделі навколишнього середовища і приймають рішення. Когнітивний дизайн тут проявляється насамперед у роботі з інформаційним навантаженням. Моделі на кшталт AERMOD, препроцесори AERMET та BPIPPRM, набір параметрів для кожного джерела й рецептора здатні легко перевантажити користувача деталями. Тому інтерфейс будується за принципом поступового розкриття складності: на перших кроках користувач бачить лише ключові параметри сценарію, найважливіші характеристики джерел і просту, зрозумілу карту.

Модель взаємодії «користувач – система» в Eco-City можна описати як цикл сприйняття, інтерпретації та дії. Користувач бачить певний стан навколишнього середовища у вигляді карти, графіків чи таблиць; інтерпретує його з позиції своїх професійних знань; формулює гіпотезу «що станеться, якщо...» і трансформує її у сценарій моделювання. Система, у свою чергу, відповідає не просто «числом», а новим візуальним станом – новою конфігурацією забруднень, індикаторів ризику, діаграм. Результати моделювання повинні бути достатньо наочними, щоб їх можна було обговорювати на нарадах, демонструвати на спільних переглядах, включати до презентацій та звітів.

У сукупності ці рішення формують інтерфейс, який не просто «обслуговує» мікросервісну архітектуру, а органічно продовжує її філософію: модульність, прозорість, семантичну узгодженість.ською екосистемою.

Кожна сторінка не лише має власну структурну логіку, а й відображає певний фрагмент предметної області. Загальний опис наявних сторінок представлено у таблиці 1. Сторінка запуску моделювання, у свою чергу, звертається до обчислювальних сервісів через API-шлюз і відображає процес виконання AERMOD у формі підтримуваних журналів, що підвищує прозорість операцій. Візуалізаційний модуль представляє результати у вигляді інтерактивної карти з накладенням ізоліній концентрацій, теплових полів та маркерів джерел, що дозволяє інтерпретувати результати в просторі та часі.

Таблиця 1 -Основні сторінки системи

№	Сторінка / Модуль	Основні функції
1	HomePage	Загальна панель, навігація, короткі індикатори стану системи
2	ScenarioListPage	Перегляд списку сценаріїв, пошук, фільтрація
3	ScenarioEditorPage	Створення нового сценарію, редагування параметрів
4	ScenarioComparePage	Порівняння базового і альтернативних сценаріїв
5	SourceCatalogPage	Список джерел, категоризація за типами (точкові, лінійні тощо)
6	SourceEditorPage	Редагування характеристик джерела, його геометрії
7	ReceptorListPage	Перегляд та управління рецепторами
8	MeteorologyUploadPage	Завантаження сирих метеоданих
9	AERMETRunPage	Запуск AERMET, перегляд журналів
10	ModelingRunPage	Запуск AERMOD, передача AERMOD.INP
11	ModelingResultsPage	Відображення результатів, таблиці, графіки
12	MapViewerPage	Інтерактивна карта, ізолінії, heatmap
13	OptimizationRunPage	Запуск оптимізації, статус виконання
14	TradeoffExplorerPage	Візуалізація Парето-фронтів
15	OntologyBrowserPage	Перегляд класів та екземплярів онтології UESO
16	DataRepositoryMonitorPage	Моніторинг стану сховищ, журнал транзакцій

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Завдяки мікросервісній архітектурі інтерфейс не повинен знати нічого про внутрішній устрій окремих сервісів. Взаємодія з ними здійснюється через єдиний API-шлюз, який виступає посередником між користувачем і складною системою моделювання. Це усуває залежність інтерфейсу від способу, у який реалізовані моделі, та дозволяє змінювати, розширювати або оновлювати обчислювальні компоненти без необхідності редизайну клієнтської частини. У результаті інтерфейс стає універсальним вікном доступу до екосистеми сервісів, що забезпечує проактивне управління (див. рис. 9).

Модуль MapViewerPage виступає центральним компонентом підсистеми геопросторової візуалізації, забезпечуючи трансформацію чисельних результатів моделювання AERMOD у візуальні аналітичні образи. Інтерфейс підтримує повний когнітивний цикл експерта: від вибору сценарію до ідентифікації критичних зон. Завдяки механізмам динамічної фільтрації параметрів (тип полютанта, часовий зріз, статистична метрика: максимум, процентиль, середнє), модуль дозволяє змінювати «оптику» дослідження, перетворюючи статичні карти на інтерактивний інструмент діагностики стану навколишнього середовища.

Модуль MapViewerPage реалізує функцію інтерактивного геопросторового інтерфейсу, що трансформує результати математичного моделювання у візуальні аналітичні моделі шляхом синтезу теплових карт, ізоліній та метрик забруднення. Це забезпечує підтримку динамічного сценарного аналізу, дозволяючи в реальному часі оцінювати просторові екологічні ризики при варіації параметрів джерел викидів або метеоумов.

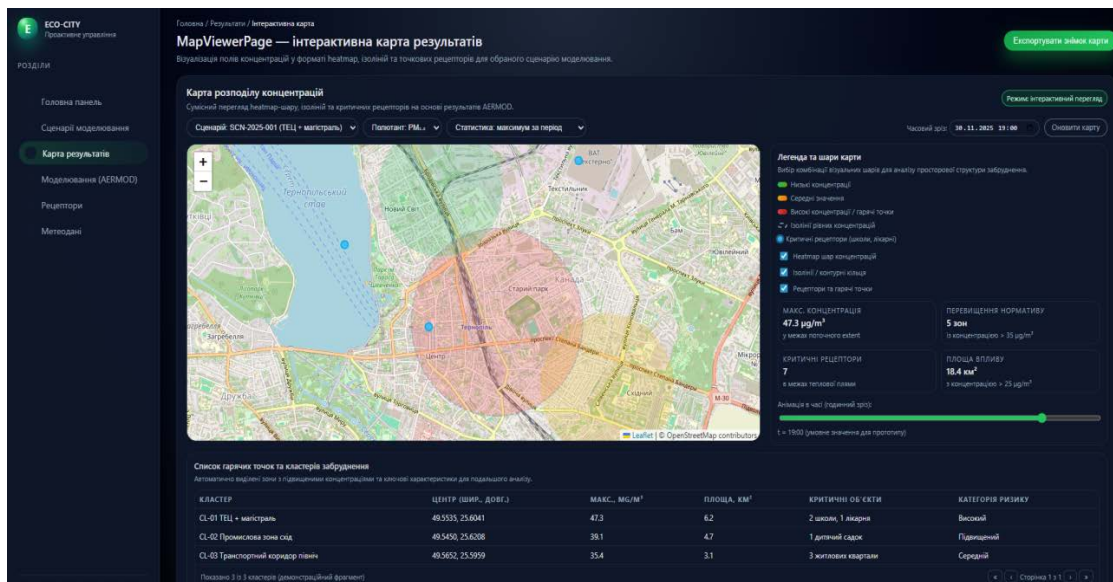


Рисунок 9 – Сторінка MapViewerPage у системі Eco-City

ВИСНОВКИ

В статті запропоновано гібридну архітектуру системи інтеграції гетерогенних даних для завдань екологічного моделювання навколишнього середовища. Ключовою особливістю розробленого підходу є використання доменної онтології як центрального семантичного хаба, що дозволяє подолати проблему різноманітності вхідних даних для екологічного моделювання та забезпечити створення «єдиного джерела істини» для всіх модулів системи. Розроблено гібридну модель зберігання даних, яка ефективно поєднує три типи технологій: онтологічне triple-store сховище для управління знаннями та логічного виведення, реляційну СУБД з геопросторовим розширенням для високопродуктивних топологічних запитів та об'єктне сховище для збереження великих бінарних артефактів та метеорологічних файлів. Така декомпозиція дозволяє інкапсулювати складність гетерогенних джерел і відокремити логіку предметної області від фізичного зберігання артефактів.

Запропоновано програмну систему, яка базується на сервісно-орієнтованій архітектурі та використанні контейнеризації. Ключовою особливістю програмної системи є розробка спеціалізованих сервісів-адаптерів, що забезпечило безшовну інтеграцію обчислювального модуля AERMOD у сучасне

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

розподілене Web-середовище. Це дозволило автоматизувати повний цикл обчислень – від препроцесингу метеоданих до генерації карт забруднення. Здійснено програмну реалізацію системи «Есо-City», яка включає підсистеми управління онтологією, сценарного екологічного моделювання та геопросторової візуалізації. Розроблено інтерактивний веб-інтерфейс, що підтримує когнітивний цикл роботи експерта, забезпечуючи візуалізацію полів концентрацій та аналіз ризиків для критичних об'єктів. Реалізовано механізми аудиту та логування процесів, що гарантує відтворюваність результатів моделювання.

ПОДЯКА

Статтю підготовлено в рамках науково-дослідного проєкту 2025.07/0207 «Концепція знання-орієнтованої технології для моделювання та прогнозування стану навколишнього природного середовища на основі неточних даних» який реалізується завдяки грантовій підтримці Національного фонду досліджень України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. WHO Global Air Quality Guidelines, 2021. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/2776fed3-acf3-43a2-b69e-f641e42a7bd8/content>
2. European Union emission inventory report. 2023. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/european-union-emissions-inventory-report-1990-2021>
3. Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>
4. Cimorelli, A. & Perry, Steve & Venkatram, Akula & Weil, Jeffrey & Paine, Robert & Wilson, Robert & Lee, Russell & Peters, Warren & Brode, Roger. (2005). AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. *Journal of Applied Meteorology – J APPL METEOROL.* 44. <https://doi.org/10.1175/JAM2227.1>.
5. Pirhalla, M., Heist, D., Perry, S., Tang, W., & Brouwer, L. (2021). Simulations of dispersion through an irregular urban building array. *Atmospheric environment (Oxford, England: 1994)*, 258, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118500>
6. Mohan, Manju & Bhati, Shweta & Sreenivas, Archana & Marrapu, Pallavi. (2011). Performance Evaluation of AERMOD and ADMS-Urban for Total Suspended Particulate Matter Concentrations in Megacity Delhi. *Aerosol and Air Quality Research.* 11. 883–894. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.05.0065>.
7. Trinity Consultants. (2023). BREEZE AERMOD: Air Quality Modeling Software. Retrieved from <https://www.breeze-software.com/software/AERMOD>
8. Trinity Consultants. (2022). BREEZE AERMOD/ISC User's Guide. Dallas, Texas: Trinity Consultants.
9. Petersen, R. L., Guerra, S. A., & Bova, A. S. (2017). Critical review of the building downwash algorithms in AERMOD. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 67(8), 826–835. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1279088>
10. Lakes Environmental Software. (2023). SCREEN View: Screening Air Dispersion Model. Retrieved from <https://www.weblakes.com/products/screen-view/>
11. Petersen, Ron & Beyer-Lout, Anke. (2012). AERMOD building downwash theoretical limitations and possible solutions. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1642.3768>.
12. SWEET Ontologies, 2006. Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET), url: <http://sweet.jpl.nasa.gov>, Last updated on: Jan 26, 2006.
13. Raskin, Robert & Pan, Michael. (2005). Knowledge representation in the Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET). *Computers & Geosciences.* 31. 1119-1125. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.12.004>.
14. V.I. Manzhula, B.S. Tymchyshyn. Semantic modeling of heterogeneous sources of harmful emissions into the atmosphere for proactive management of the city ecosystem. *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: "Informatics, Cybernetics and Computing"*. 2025. No. 2 (41), pp. 118–127. <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2025-2-41-118-127>.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

15. R. Raskin and M. Pan, "Semantic web for earth and environmental terminology (sweet)", in Proc. of the Workshop on Semantic Web Technologies for Searching and Retrieving Scientific Data, vol. 25, 2003.
16. Athanasiadis Ioannis, Rizzoli Andrea-Emilio, Donatelli Marcello & Carlini, L. (2006). Enriching software model interfaces using ontology-based tools.
17. Tymchyshyn B., Manzhula V. Mathematical and algorithmic support of a software system for proactive management of the city ecosystem. Measuring and computing technology in technological processes. 2025. vol. 84, no. 4, pp. 35–48. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-840-4>.

Дата надходження: 10.04.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 20.05.2026

Дата публікації: 18.06.2026

*Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)*

ПУКАС АНДРІЙ ВАСИЛЬОВИЧ – д.т.н., професор, Західноукраїнський національний університет, Україна, [e-mail: apu@wunu.edu.ua](mailto:apu@wunu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-0230-9741>

СПІВАК ІРИНА ЯРОСЛАВІВНА – к.т.н., доцент, Західноукраїнський національний університет, Україна, [e-mail: i.spivak@wunu.edu.ua](mailto:i.spivak@wunu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4831-0780>

ТИМЧИШИН БОГДАН СТЕПАНОВИЧ – доктор філософії, Західноукраїнський національний університет, Україна, [e-mail: tymchyshyn.bohdan@gmail.com](mailto:tymchyshyn.bohdan@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0008-0920-9122>

БРИЧ БОГДАН ВАСИЛЬОВИЧ – доктор філософії, Західноукраїнський національний університет, Україна, [e-mail: bogdan.brych@gmail.com](mailto:bogdan.brych@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-6868-1979>

МАНЖУЛА ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ – аспірант, Західноукраїнський національний університет, Україна, [e-mail: volodymyrmanzhula@gmail.com](mailto:volodymyrmanzhula@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-0408-8745>

Andriy PUKAS, Iryna SPIVAK, Bohdan TYMCHYSHYN, Bohdan BRYCH, Volodymyr MANZHULA
HYBRID ARCHITECTURE OF DATA INTEGRATION AND PROCESSING SYSTEM FOR
MODELING AND FORECASTING OF THE STATE OF THE NATURAL ENVIRONMENT
West Ukrainian National University, Ukraine