

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Аналіз критеріїв екологічної безпеки промислових підприємств»

Виконав: студент групи ТЗД-24 м
спеціальності 183 – «Технології захисту
навколишнього середовища»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Цимбалюк О. П.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор кафедри ЕХТЗД

Сакалова Г. В.

(прізвище та ініціали)

«09» листопада 2025 р.

Опонент: д.х.н., професор кафедри ЕХТЗД

Ранський А. П.

(прізвище та ініціали)

«09» листопада 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕХТЗД

к.т.н., доц. Іщенко В.А.

(прізвище та ініціали)

«09» грудня 2025 р.

Вінниця – 2025 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Факультет Будівництва, цивільної та екологічної інженерії

Кафедра Екології, хімії та технологій захисту довкілля

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань – 18 «Виробництво та технології»

Спеціальність – 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Освітньо-професійна програма – «Технології захисту навколишнього середовища»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕХТЗД

Іщенко В.А.

« 24 » вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Цимбалюку Олександр Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз критеріїв екологічної безпеки промислових підприємств»

керівник роботи Сакалова Галина Володимирівна

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 10 ” вересня 2025 року № 2

2. Строк подання студентом роботи «09» грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Нормативні характеристики забруднювальних речовин та їхні гранично допустимі концентрації.

4. Зміст текстової частини:

1. Аналіз сучасного стану проблеми екологічної безпеки промислових підприємств

2. Теоретичні та методичні основи створення інформаційної системи для аналізу критеріїв екологічної безпеки

3. Проектування та програмна реалізація інформаційної системи

4. Верифікація тестування та аналіз результатів роботи програми

5. Економічне обґрунтування впровадження інформаційної системи

5. Перелік ілюстративного матеріалу

1. Алгоритмічна блок-схема роботи системи
2. Узагальнена схема алгоритму визначення категорії екологічної небезпеки підприємства
3. Структурна схема архітектури інформаційної системи
4. Загальний вигляд інтерфейсу системи
5. Відображення інтерфейсу у темній темі з англійською локалізацією
6. Сертифікат за участь в міжнародній науково-технічній конференції

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
5 Економічне обґрунтування впровадження інформаційної системи	декан ФМІБ, к.е.н., доц. Краєвська Алла Станіславівна		

7. Дата видачі завдання « 24 » вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Аналіз вимог до інформаційних систем екологічного моніторингу.	24.09.2025	03.10.2025	
2	Дослідження методів оцінювання промислових викидів та небезпеки.	03.10.2025	25.10.2025	
3	Аналіз алгоритмів визначення екологічної категорії підприємства.	25.10.2025	10.11.2025	
4	Аналіз структур даних для побудови екологічної системи.	10.11.2025	20.11.2025	
5	Підготовка висновків, додатків і переліку літератури. Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	20.11.2025	25.11.2025	
6	Підготовка презентації та доповіді на захист МКР	25.11.2025	03.12.2025	

Студент

Цимбалюк О. П.

Керівник роботи

Сакалова Г. В.

АНОТАЦІЯ

УДК 504.06

Цимбалюк О. П. «Аналіз критеріїв екологічної безпеки промислових підприємств». Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 183 – «Технології захисту навколишнього середовища», освітня програма – «Технології захисту навколишнього середовища». Вінниця: ВНТУ, 2025. 96 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 40 назв; рис.: 24; табл.: 6.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено інформаційну систему EcologIS, призначену для автоматизованого аналізу екологічної небезпеки промислових підприємств. На основі нормативних показників забруднювальних речовин створено математичну модель розрахунку комплексного показника небезпечності та визначення категорії підприємства. Реалізовано алгоритм побудови санітарно-захисної зони з інтерактивною візуалізацією на картографічній платформі. Проведено тестування системи на прикладі реального підприємства та виконано оцінку еколого-економічної ефективності її впровадження. Запропоновано рекомендації щодо підвищення точності екологічного моніторингу та зниження ризиків впливу на довкілля.

Ключові слова: інформаційна система, екологічна безпека, промислові викиди, категорія небезпечності, санітарно-захисна зона.

ABSTRACT

UDC 504.06

Tsymbalyuk O. P. "Analysis of Environmental Safety Criteria of Industrial Enterprises". Master's qualification work on specialty 183 – "Technologies of environmental protection", educational program – "Technologies of environmental protection". Vinnytsia: VNTU, 2025. 96 p.

In Ukrainian language. Bibliography: 40 titles; Fig.: 24; tab.: 6.

In the master's qualification work, an information system EcologIS was developed to automate the assessment of environmental hazard levels of industrial enterprises. A mathematical model for calculating the integrated hazard index and determining the enterprise category was created based on regulatory pollutant parameters. An algorithm for generating the sanitary protection zone with interactive cartographic visualization was implemented. The system was tested using data from a real industrial facility, and its ecological and economic efficiency was evaluated. Recommendations aimed at improving the accuracy of environmental monitoring and reducing environmental risks were proposed.

Key words: information system, environmental safety, industrial emissions, hazard category, sanitary protection zone.

ВІДГУК

наукового керівника на магістерську кваліфікаційну роботу Цимбалюка О. П. «Аналіз критеріїв екологічної безпеки промислових підприємств»

Стан екологічної безпеки промислових підприємств в Україні в цілому та у Вінницькій області зокрема залишається проблемним. Велику роль у цьому відіграють значні обсяги викидів забруднюючих речовин, складність їх інвентаризації та необхідність своєчасного контролю за впливом на довкілля. Тому аналіз критеріїв екологічної небезпеки підприємств є важливою науковою задачею та практичним завданням для підвищення ефективності природоохоронної діяльності.

У процесі виконання магістерської кваліфікаційної роботи магістрант Цимбалюк О. П. на підставі проведених власних аналітичних досліджень здійснив комплексний аналіз екологічної небезпеки промислових підприємств та оцінку їх впливу на навколишнє природне середовище відповідно до чинних нормативних вимог.

Особливо цінною є розроблена інформаційна система для автоматизованого визначення категорії небезпеки підприємств, яка може бути використана для підвищення точності розрахунків, оптимізації екологічної звітності та практичного удосконалення екологічного моніторингу.

Магістрант Цимбалюк О. П. характеризується виключно з позитивного боку, відповідальний, володіє ґрунтовними професійними знаннями у сфері екологічного аналізу, вчасно та якісно виконав всі поставлені завдання.

Магістерська кваліфікаційна робота виконана на високому рівні і має значну практичну цінність. Тому вважаю, що робота заслуговує на високу оцінку.

Науковий керівник:

д. т. н., проф. каф. ЕХТЗД



Галина САКАЛОВА

ВІДГУК

опонента на магістерську кваліфікаційну роботу Цимбалука О. П. «Аналіз критеріїв екологічної безпеки промислових підприємств»

Тема роботи є актуальною, оскільки промислові підприємства залишаються ключовими джерелами техногенного навантаження, а їх екологічна безпека потребує сучасних інструментів оцінювання. Магістрант продемонстрував володіння нормативною базою, передовими методами аналізу та навичками застосування інформаційних технологій. Створена система EcologIS є логічним і практично значущим результатом виконаного дослідження.

Робота відзначається чіткою структурою, коректною реалізацією алгоритмів і повним описом розрахункової моделі. У ній послідовно розкрито механізм визначення категорії небезпечності підприємства та показано практичні можливості програмного продукту. Економічна частина містить обґрунтовані розрахунки окупності та демонструє реальну вигоду від впровадження системи.

Як зауваження можна відзначити певну перевантаженість окремих фрагментів технічними деталями, що інколи ускладнює сприйняття основного змісту та потребує легшої структуризації матеріалу.

Загалом робота відзначається високим рівнем виконання, достатньою науковою обґрунтованістю та практичною цінністю. Результати можуть бути використані для подальшої автоматизації екологічного моніторингу та аналітичної діяльності підприємств.

Магістерська кваліфікаційна робота заслуговує на оцінку «А».

Опонент:

д. х. н., проф. каф. ЕХТЗД



Анатолій РАНСЬКИЙ

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	7
1.1 Сутність і поняття екологічної безпеки промислових підприємств	7
1.2 Нормативно-правові засади класифікації підприємств за ступенем екологічної небезпеки	10
1.3 Методи оцінки рівня екологічної небезпеки промислових підприємств	13
1.4 Аналіз сучасних програмних засобів екологічного моніторингу	17
2 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ КРИТЕРІЇВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ	22
2.1 Постановка задачі автоматизованого аналізу екологічної небезпеки	22
2.2 Розроблення алгоритму визначення категорії екологічної небезпеки підприємства.....	25
2.3 Формування математичної та інформаційної моделі системи.....	29
2.4 Логічна структура даних та організація взаємозв'язків у програмі	32
3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	34
3.2 Архітектура програмного продукту та структура модулів	36
3.3 Реалізація основних функціонали компонентів інформаційної системи	38
3.4 Інтерфейс користувача та принципи взаємодії з програмою.....	45
4 ВЕРИФІКАЦІЯ ТЕСТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ ПРОГРАМИ.....	51
4.1 Методика перевірки достовірності результатів і точності розрахунків ..	51
4.2 Приклад застосування системи для оцінки екологічної небезпеки конкретного підприємства.....	54
4.3 Порівняння результатів роботи програми з нормативними методами розрахунку.....	61

4.4 Аналіз ефективності використання програми у сфері екологічного моніторингу.....	66
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	69
5.1 Розрахунок витрат на створення та впровадження інформаційної системи	69
5.2 Економічна оцінка ефективності використання програмного продукту .	71
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80
Додаток А. Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	84
Додаток Б. Ілюстративна частина.....	85

ВСТУП

Промислові підприємства становлять основу економічного потенціалу країни, проте саме вони формують найбільше техногенне навантаження на навколишнє природне середовище. Збільшення масштабів виробництва, використання енерго- та ресурсоемних технологічних процесів, експлуатація великої кількості обладнання та накопичення промислових відходів призводять до суттєвого зростання обсягів забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів. Порушення природних екосистем, погіршення стану довкілля та підвищення рівня техногенних ризиків потребують впровадження сучасних інструментів контролю й управління екологічною безпекою. У таких умовах стає необхідним розвиток інтелектуальних інформаційних систем, здатних оперативно оцінювати екологічний вплив підприємств та виявляти потенційні загрози для довкілля.

Екологічна безпека промислових об'єктів визначається обсягами та характеристиками шкідливих викидів, рівнем технічного стану виробничих потужностей, дотриманням нормативів та ефективністю природоохоронних заходів. Чинні законодавчі та нормативні акти містять значну кількість критеріїв і показників, за якими необхідно здійснювати оцінювання екологічної небезпеки підприємства. Проте на практиці ці дані потребують складної обробки, систематизації та інтерпретації, що часто унеможливорює оперативний аналіз і створює ризик помилок у розрахунках. Відсутність інтегрованих інформаційних систем призводить до того, що процес оцінювання екологічної небезпеки є фрагментованим, громіздким і залежним від людського фактора. Тому розроблення автоматизованого інструмента для обчислення показників небезпеки на основі реальних даних про викиди є актуальним завданням сучасної екологічної науки та практики.

Створення інформаційної системи, здатної виконувати математичний аналіз екологічних показників, забезпечить можливість значно підвищити точність визначення категорії небезпеки промислового підприємства.

Інтеграція алгоритмів обробки даних, автоматизованих розрахунків і засобів візуалізації дозволяє сформувати інструмент, який мінімізує ймовірність помилок і забезпечує об'єктивність оцінки впливу виробничої діяльності на довкілля. Важливою складовою таких систем є також можливість моделювати радіус зони впливу підприємства та надавати рекомендації щодо підвищення рівня екологічної безпеки, що сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Мета роботи: створення інформаційної системи для автоматизованої оцінки екологічної небезпеки промислових підприємств шляхом розрахунку категорії небезпеки за масою викидів забруднюючих речовин, аналізу екологічних показників та представлення результатів у зручній аналітичній та візуальній формах.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі наукові та прикладні завдання:

- здійснити аналіз сучасних методів і підходів до оцінювання екологічної небезпеки;
- дослідити структуру нормативної бази щодо класифікації підприємств за категоріями потенційної небезпеки;
- сформувати алгоритми автоматизованого розрахунку екологічних показників на основі вхідних параметрів;
- створити програмний модуль, який забезпечує виконання математичних обчислень та їх перевірку за встановленими критеріями;
- розробити модель візуалізації результатів оцінювання із відображенням зони потенційного впливу підприємства;
- протестувати функціональність системи на прикладах типових промислових підприємств і оцінити її ефективність.

Об'єкт дослідження: процес оцінювання екологічної небезпеки промислових підприємств на основі даних про масу та склад забруднюючих речовин, що надходять у навколишнє середовище.

Предмет дослідження: інформаційні технології, методи аналізу та алгоритми обробки екологічних даних, які забезпечують автоматизоване визначення рівня небезпеки підприємства та формування аналітичних висновків.

Наукова новизна полягає у створенні інтегрованої методики, що об'єднує математичні моделі розрахунку екологічних показників, структуровану базу даних і програмний модуль, який здійснює комплексну оцінку рівня небезпеки. Розроблений алгоритм дозволяє автоматизувати процес, який традиційно виконується вручну та потребує значних часових і інтелектуальних ресурсів. Запропонований підхід забезпечує можливість точного визначення категорії небезпеки, а також моделювання просторових характеристик впливу на довкілля.

Практичне значення полягає у створенні інструмента, який може бути застосований промисловими підприємствами, екологічними аудиторами, аналітичними центрами та органами контролю для швидкого й достовірного оцінювання екологічної небезпеки. Використання системи забезпечує підвищення оперативності аналізу, оптимізацію процесу формування звітності, мінімізацію людських помилок та підвищення рівня прозорості екологічного моніторингу. Запропоноване рішення також може бути інтегроване в сучасні цифрові екосистеми управління довкіллям, сприяючи розвитку інтелектуальних природоохоронних технологій.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні матеріали та висновки роботи знайшли відображення у публікації.

1. Олександр Петрович Цимбалюк, Галина Володимирівна Сакалова, Інформаційні технології як інструмент оцінки категорії підприємств та управління екологічними ризиками. Проблеми екології та енергозбереження: матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2025. – 302-306 с. ISBN 978-966-321-491-7 [1].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Сутність і поняття екологічної безпеки промислових підприємств

Проблема забезпечення екологічної безпеки на промислових підприємствах належить до кола найбільш актуальних завдань сучасного світу. Упродовж останніх десятиліть техногенне навантаження на природне середовище невпинно зростає, що проявляється у збільшенні кількості джерел забруднення, підвищенні концентрації шкідливих речовин в атмосфері та деградації природних екосистем. Інтенсивна урбанізація, виснаження природних ресурсів і зміна клімату формують потребу у новій екологічній політиці, заснованій на принципах сталого розвитку та безпечного виробництва.

Промислові підприємства становлять ядро економіки, але водночас вони є основними споживачами енергії, води та сировини, а також генераторами відходів. Будь-яке відхилення у технологічних процесах або недостатній контроль за обсягами викидів призводять до порушення екологічної рівноваги та створюють потенційні загрози здоров'ю людей. Саме тому поняття “екологічна безпека” в промисловому секторі розглядається не лише як правова вимога, а як стратегічний індикатор технологічної зрілості підприємства та показник рівня його відповідальності перед суспільством.

У загальному розумінні екологічна безпека — це стан захищеності людини, суспільства та природного середовища від негативного антропогенного впливу, який може призвести до деградації екосистем або виникнення надзвичайних екологічних ситуацій. У межах виробничої діяльності цей термін трактується як здатність підприємства забезпечувати технологічні процеси без перевищення нормативів гранично допустимих викидів, скидів і рівнів впливу на довкілля. Іншими словами, екологічна безпека — це система взаємопов'язаних організаційних, технічних і

управлінських заходів, спрямованих на попередження або мінімізацію шкідливих наслідків господарської діяльності [1].

Наукові дослідження в галузі охорони довкілля визначають, що поняття екологічної безпеки охоплює не лише захист природних ресурсів від забруднення, але й підтримання стійкого функціонування природних систем у межах їхнього відновлювального потенціалу. Для промислових підприємств це означає впровадження комплексного підходу до управління ресурсами: від планування використання сировини й енергії до поводження з відходами та рекультивації порушених територій. Таким чином, екологічна безпека набуває системного характеру і перетворюється на інтегральний компонент виробничої стратегії.

Особливу роль у забезпеченні екологічної безпеки відіграють технологічні рішення. Застосування застарілого обладнання, відсутність ефективних очисних споруд і недосконалі системи моніторингу часто є головними причинами перевищення нормативів шкідливих викидів. Водночас впровадження енергозберігаючих технологій, автоматизованих систем контролю параметрів повітря та води, використання вторинної сировини істотно знижують навантаження на довкілля. Таким чином, технічна модернізація підприємства є безпосередньою умовою підвищення рівня його екологічної безпеки.

Варто наголосити, що екологічна безпека — це не лише технічна категорія, а й управлінська. Вона передбачає розроблення екологічної політики підприємства, створення системи екологічного менеджменту, проведення регулярного моніторингу стану довкілля, а також оцінювання ризиків, пов'язаних із діяльністю виробництва. У міжнародній практиці ці аспекти регламентуються стандартами серії ISO 14000, які визначають вимоги до систем екологічного управління. Запровадження таких систем забезпечує систематичний контроль за екологічними показниками, дає можливість підвищити довіру громадськості та інвесторів до діяльності підприємства [4].

Для України, як держави з розвинутою промисловою структурою, питання екологічної безпеки має подвійний характер — соціально-економічний та природоохоронний. З одного боку, промислові підприємства забезпечують зайнятість населення, наповнення бюджету, розвиток інфраструктури; з іншого — саме вони є основними джерелами забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів і земельних ресурсів. Такий дисбаланс потребує пошуку інноваційних рішень, здатних узгодити інтереси економіки та екології. Одним із таких рішень є створення ефективних інформаційних систем екологічного моніторингу, які дають змогу здійснювати аналіз даних про викиди, контролювати дотримання нормативів і своєчасно реагувати на відхилення.

Сутність екологічної безпеки промислового підприємства можна визначити через систему взаємодії трьох основних компонентів: технічного, управлінського та інформаційного. Технічний компонент охоплює засоби запобігання забрудненню — фільтри, очисні споруди, автоматизовані системи контролю. Управлінський компонент включає розробку політики, планування природоохоронних заходів, контроль виконання нормативів і навчання персоналу. Інформаційний компонент — це обробка, зберігання й аналіз даних, що характеризують вплив підприємства на довкілля. Без ефективної інформаційної підтримки неможливо приймати своєчасні рішення щодо зниження екологічних ризиків або планування модернізації виробництва.

Останніми роками інформаційні технології стали невід'ємною частиною систем екологічного управління. Автоматизовані програми дозволяють інтегрувати показники викидів, вести бази даних забруднюючих речовин, формувати аналітичні звіти й навіть прогнозувати наслідки змін у виробничих процесах. Це відкриває новий рівень контролю за екологічними параметрами, роблячи процес прийняття рішень більш обґрунтованим і прозорим. Тому інформаційна складова сьогодні розглядається не як допоміжна, а як ключова частина системи екологічної безпеки [5].

Отже, екологічна безпека промислових підприємств — це комплексна характеристика, що поєднує технічні, організаційні, правові та інформаційні аспекти забезпечення безпечного функціонування виробництва. Вона відображає рівень узгодженості економічних інтересів підприємства з вимогами екологічного законодавства та принципами сталого розвитку. Досягнення високого рівня екологічної безпеки можливе лише за умови системного підходу, який охоплює аналіз усіх елементів виробничого процесу, застосування сучасних технологій та впровадження цифрових методів оцінювання впливу на довкілля. Саме тому питання створення інформаційних систем для автоматизованого аналізу критеріїв екологічної безпеки набуває особливої ваги, стаючи логічним продовженням загальної стратегії екологізації промисловості.

1.2 Нормативно-правові засади класифікації підприємств за ступенем екологічної небезпеки

Правове регулювання питань екологічної безпеки в Україні ґрунтується на системі законодавчих, підзаконних і нормативно-методичних актів, які визначають порядок оцінювання, контролю та управління впливом господарської діяльності на довкілля. Ця система формує правові засади забезпечення екологічно збалансованого розвитку промисловості, регламентує обов'язки підприємств щодо запобігання забрудненню, а також встановлює критерії, за якими визначається ступінь екологічної небезпеки конкретного об'єкта.

Законодавство України у сфері охорони навколишнього природного середовища має системний характер і включає як базові принципи державної екологічної політики, так і спеціалізовані вимоги до окремих видів діяльності. Основоположним документом у цій галузі є Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25 червня 1991 року № 1264-ХІІ. Саме цей закон уперше закріпив поняття екологічної безпеки як стану захищеності людини, суспільства і природи від шкідливих впливів

господарської діяльності. Він визначає права громадян на безпечне довкілля, компетенції органів влади, порядок контролю за дотриманням екологічних нормативів та основні напрями державної політики у сфері природокористування [2].

Важливе місце у правовому забезпеченні класифікації підприємств за ступенем екологічної небезпеки займає Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23 травня 2017 р. № 2059-VIII. Цей документ замінив застарілий Закон «Про екологічну експертизу» і запровадив нову європейську модель екологічного оцінювання, яка базується на принципах прозорості, участі громадськості та електронного доступу до екологічної інформації. Закон встановлює перелік видів діяльності, що можуть мати значний вплив на довкілля, визначає процедуру підготовки звіту з оцінки впливу, проведення громадських обговорень та прийняття рішення уповноваженим органом. Результатом процедури є висновок з оцінки впливу на довкілля, який містить характеристику потенційного впливу діяльності, перелік екологічних ризиків і заходи для їх запобігання [3].

На розвиток положень закону спрямована Постанова Кабінету Міністрів України № 1026 від 13 грудня 2017 р. «Про затвердження Порядку передачі документації для надання висновку з оцінки впливу на довкілля та порядку ведення Єдиного реєстру з ОВД». Цей документ чинний і визначає процедуру подання, розгляду та зберігання матеріалів оцінки впливу, а також механізм електронної взаємодії учасників процесу через Єдиний державний реєстр з ОВД. У 2023 році було ухвалено Закон № 3227-IX, який вніс зміни до чинного законодавства та забезпечив повну цифровізацію процедури ОВД, що передбачає електронний документообіг, автоматичну реєстрацію заяв, інтеграцію з реєстрами Міндовкілля та доступ громадськості до всіх матеріалів.

Разом із тим, у практичній діяльності фахівці екологічного контролю продовжують користуватися положеннями, викладеними у Постанові КМУ № 808 від 28 серпня 2013 р. «Про затвердження переліку видів діяльності та

об'єктів, що становлять підвищену екологічну небезпеку», яка втратила чинність у 2019 році, проте зберегла значення як методичне джерело. Вона вперше систематизувала галузі, що мають найбільший вплив на довкілля: хімічну промисловість, енергетичний сектор, металургію, добувну галузь, переробку нафти, виробництво будівельних матеріалів, сільське господарство з використанням агрохімікатів тощо. Ці види діяльності залишаються об'єктами підвищеної уваги й нині, оскільки саме вони визначають основні джерела техногенного навантаження на природне середовище [14].

Практична класифікація підприємств за ступенем екологічної небезпеки нині здійснюється відповідно до Методичних рекомендацій з визначення категорій підприємств за ступенем екологічної небезпеки, розроблених на основі чинного Закону «Про охорону навколишнього природного середовища» та з урахуванням показників викидів забруднюючих речовин. Ці рекомендації залишаються актуальними в аналітичній роботі, оскільки забезпечують кількісний підхід до оцінки впливу підприємств. Відповідно до методики, підприємства поділяються на чотири категорії екологічної небезпеки:

- I категорія — об'єкти з найбільшим потенційним впливом на довкілля, що потребують безперервного моніторингу, спеціальних систем очищення та постійного державного контролю;

- II категорія — підприємства з істотним, але регульованим впливом, для яких передбачено періодичний нагляд і екологічний аудит;

- III категорія — виробництва середнього рівня небезпеки, що здійснюють контроль переважно на рівні внутрішнього моніторингу;

- IV категорія — об'єкти з незначним впливом, для яких характерний локальний екологічний ризик і мінімальна потреба у державному контролі [6].

У ряді методик, розроблених окремими науковими установами, також виокремлюють V категорію — підприємства, вплив яких практично відсутній або обмежується межами виробничого майданчика (наприклад, об'єкти побутового чи сервісного призначення). Такий поділ застосовується в

наукових дослідженнях або при створенні програмного забезпечення для попередньої оцінки рівня екологічної небезпеки.

Основним кількісним критерієм віднесення підприємства до певної категорії є маса викидів забруднюючих речовин за рік з урахуванням класу їх токсичності, потенціалу розсіювання в атмосфері та площі зони впливу. При цьому враховується не лише загальний обсяг, а й індекс токсичності речовин, сумарний показник небезпеки, а також радіус екологічного впливу, який характеризує масштаби потенційного забруднення повітря, водних і ґрунтових ресурсів. Такий підхід дозволяє проводити оцінювання екологічного ризику більш комплексно й обґрунтовано, що відповідає міжнародним практикам.

Крім національного законодавства, важливу роль у регулюванні питань екологічної безпеки відіграють міжнародні нормативно-правові акти, до яких приєдналася Україна. Серед них — Орхуська конвенція (1998 р.) про доступ громадськості до екологічної інформації та Базельська конвенція (1989 р.) про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів. Додатково, у межах інтеграції до Європейського Союзу, застосовуються вимоги Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди та принципи стандартів ISO 14000, що визначають засади створення систем екологічного менеджменту підприємств. Їхнє впровадження сприяє гармонізації національної системи класифікації небезпеки з європейськими підходами [7].

1.3 Методи оцінки рівня екологічної небезпеки промислових підприємств

Оцінювання екологічної небезпеки промислових підприємств є ключовим етапом формування державної політики у сфері охорони довкілля та управління ризиками техногенного впливу. Складність цього процесу полягає в тому, що промислові об'єкти суттєво відрізняються за масштабами виробництва, технологіями, характером викидів, складом сировини й обсягами утворюваних відходів. Саме тому виникла потреба у створенні уніфікованих методик, які дозволяють кількісно оцінити рівень небезпеки,

визначити категорію підприємства та розробити відповідні природоохоронні заходи.

Загальна мета методів оцінки полягає у встановленні кількісної або якісної характеристики ступеня впливу промислової діяльності на довкілля, тобто у визначенні міри ризику виникнення екологічних порушень. У практиці екологічного аналізу використовують два підходи — індикаторний (якісний) та розрахунковий (кількісний). Перший базується на експертних оцінках і враховує фактори технологічного, санітарного та організаційного характеру; другий — на об'єктивних даних вимірювань, що відображають масу, склад і властивості забруднюючих речовин.

Одним із найпоширеніших кількісних методів є індексний підхід, за якого рівень екологічної небезпеки визначається через розрахунок інтегрального показника небезпеки (ІН). Він характеризує сукупний вплив усіх шкідливих речовин, що викидаються в атмосферу, скидаються у водні об'єкти або розміщуються у відходах. Згідно з методичними рекомендаціями Міндовкілля, інтегральний показник розраховується як сума добутків маси викидів конкретних речовин на коефіцієнт їх небезпечності:

$$IH = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot K_i) \quad (1.1)$$

де M_i — річна маса викидів i -ї речовини, т/рік;
 K_i — коефіцієнт небезпечності, що враховує клас токсичності речовини, її здатність до накопичення в екосистемі, тривалість дії та віддалені наслідки.

Коефіцієнт K_i визначається відповідно до класу небезпечності речовини, який устанавлюється згідно з діючими нормативами. В Україні застосовується чотирікласна система, де I клас — надзвичайно небезпечні речовини (ртуть, свинець, бенз(а)пірен), II клас — високонебезпечні, III клас — помірно небезпечні, IV клас — малонебезпечні. Для більш точного врахування впливу в розрахунок також вводиться коефіцієнт токсичності повітряного

розсіювання (T), який залежить від фізико-хімічних властивостей речовини та кліматичних умов території [7].

Розраховане значення інтегрального показника дозволяє визначити категорію екологічної небезпеки підприємства. На практиці застосовується така шкала (орієнтовно за методикою Міндовкілля та Державного агентства екологічного контролю) таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 - Класифікація підприємств за категоріями екологічної небезпеки за величиною інтегрального показника

Категорія	Характеристика рівня небезпеки	Умовні межі інтегрального показника ІН
I	Дуже високий рівень впливу, значний ризик деградації довкілля, обов'язковий державний моніторинг	$ІН > 10\ 000$
II	Високий рівень впливу, потребує постійного контролю і регулярних перевірок	5 000–10 000
III	Середній рівень небезпеки, локальний вплив у межах населеного пункту	1 000–5 000
IV	Низький рівень впливу, контроль переважно внутрішній	100–1 000
V	Мінімальний вплив, контроль здійснюється періодично або не потрібен	< 100

У більш розгорнутих моделях методика може включати коригувальні коефіцієнти, що враховують територіальний фактор (F), ефективність очисних споруд (E) та відстань до житлової зони (D). У такому разі інтегральний показник набуває вигляду:

$$ІН_{п} = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot K_i \cdot F \cdot E \cdot D) \quad (1.2)$$

Де коефіцієнти нормуються в межах від 0 до 1. Наприклад, для сучасних очисних споруд $E=0,3$, а для підприємств без систем очищення $E=1$.

Важливою складовою розрахунку є визначення радіуса зони впливу (R) — просторової межі, в якій концентрація шкідливих речовин перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК). Для цього використовуються рівняння атмосферної дифузії або спрощені емпіричні формули, зокрема:

$$R = \sqrt{\frac{M_i}{\pi \cdot C_{\text{ГДК}} \cdot h}} \quad (1.3)$$

Де $C_{\text{ГДК}}$ — гранично допустима концентрація речовини в повітрі, мг/м³,
 h — висота джерела викиду, м.

Радіус зони впливу дозволяє оцінити територію потенційного ризику, а при моделюванні в геоінформаційних системах він використовується для побудови буферних зон, що наочно демонструють масштаби екологічного впливу.

У випадку, коли підприємство має декілька джерел викидів, розрахунки проводяться окремо для кожного джерела, після чого результати сумуються з урахуванням поправки на взаємодію потоків забруднення. Для об'єктів, які здійснюють не лише атмосферні викиди, а й скиди у водойми, застосовується комплексна оцінка небезпеки (ІНк), у якій враховуються також маса скидів і коефіцієнти розбавлення водних об'єктів [8].

Паралельно з аналітичними методами дедалі ширше використовуються інформаційно-аналітичні системи екологічної оцінки, які дозволяють автоматизувати розрахунок інтегральних показників. Такі системи застосовують бази даних небезпечних речовин, нормативи ГДК, алгоритми класифікації за категоріями небезпеки, а також модулі візуалізації результатів у вигляді таблиць, графіків і картографічних шарів. Їх перевагою є можливість одночасного опрацювання великого масиву даних, уникнення арифметичних помилок і швидке оновлення розрахунків при зміні вхідних параметрів.

Методи оцінки екологічної небезпеки, засновані на кількісних розрахунках, дають змогу не лише класифікувати підприємства за ступенем впливу, а й виявити критичні точки виробничого процесу, що потребують модернізації або додаткового контролю. Водночас якісний аналіз — через екологічні аудити, експертні оцінки та опитування — дозволяє враховувати соціальні, організаційні та управлінські фактори, які не піддаються точним розрахункам. Поєднання цих підходів формує цілісну методику, здатну відобразити реальний рівень екологічної небезпеки підприємства.

Таким чином, сучасні методи оцінювання рівня екологічної небезпеки мають комплексний характер і поєднують кількісні математичні моделі з елементами інформаційних технологій. Використання автоматизованих систем дозволяє суттєво підвищити точність і швидкість розрахунків, а також забезпечує об'єктивність класифікації підприємств за ступенем екологічного ризику. Подальший розвиток таких методів пов'язаний із цифровізацією екологічного моніторингу, інтеграцією баз даних у національні реєстри та впровадженням програмних інструментів, які здатні в реальному часі відображати зміни екологічного стану довкілля.

1.4 Аналіз сучасних програмних засобів екологічного моніторингу

Сучасний розвиток екологічного моніторингу нерозривно пов'язаний із цифровізацією процесів збору та аналізу даних про стан навколишнього середовища. Автоматизація спостережень, використання сенсорних технологій і геоінформаційних систем дозволяють значно підвищити точність оцінки стану довкілля та своєчасно виявляти потенційні ризики для населення і промислових територій. У більшості країн, зокрема і в Україні, активно впроваджуються інформаційно-аналітичні платформи, які об'єднують функції спостереження, обробки та публікації екологічної інформації.

Одним із найвідоміших українських прикладів є система SaveEcoBot (рис. 1.1), створена громадською організацією “SaveDnipro”. Це інтерактивний вебпортал, який об'єднує відкриті екологічні дані з державних

джерел і незалежних вимірювальних станцій. Платформа надає користувачам доступ до карт якості атмосферного повітря, рівня фонові радіації, інформації про результати перевірок Державної екологічної інспекції, дозволи на викиди, а також дані з реєстру оцінки впливу на довкілля. Система інтегрована з мережею автоматичних сенсорів і громадських станцій моніторингу, що дозволяє отримувати актуальну інформацію в режимі реального часу. Важливою особливістю SaveEcoBot є її відкритість: усі дані доступні громадськості безкоштовно, що сприяє формуванню культури екологічної прозорості в Україні [9].

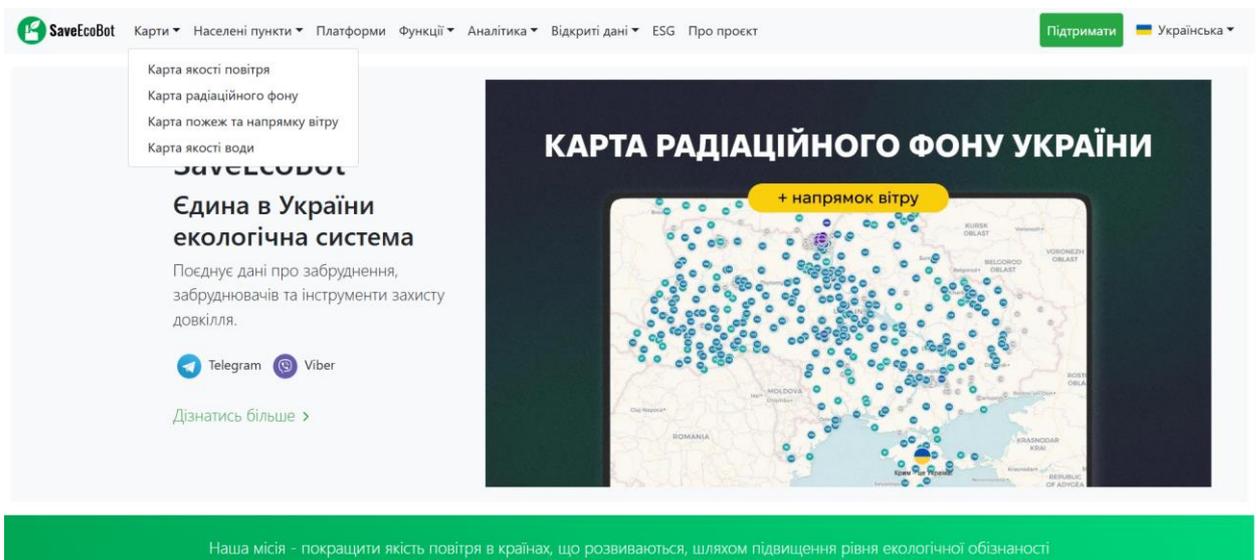


Рисунок 1.1 – Інтерактивний вебпортал екологічних даних SaveEcoBot

Іншим напрямом цифровізації екологічної інформації є державна система моніторингу довкілля (ДСМД), яка функціонує на основі Постанови Кабінету Міністрів України № 391 від 30 березня 1998 року. Система забезпечує координацію між міністерствами, науковими установами та підприємствами, які проводять вимірювання якості повітря, води, ґрунтів і рівня радіації. Дані ДСМД використовуються для формування державних екологічних звітів, а також інтегруються у міжнародні екологічні бази. У 2024 році прийнято оновлений Порядок функціонування ДСМД та її підсистем, який передбачає розширення мережі автоматизованих постів спостереження, використання телеметрії та уніфікацію форматів передавання даних. Система

має стратегічне значення для оцінки впливу промислових підприємств і розроблення заходів із підвищення екологічної безпеки [10].

Важливим кроком у напрямі діджиталізації стало створення національної інформаційно-аналітичної платформи “EcoSystem” рисунок 1.2, яка розробляється під координацією Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. Цей портал, відомий також як Open Environment Portal, інтегрує дані державного моніторингу довкілля, звіти з оцінки впливу, реєстри відходів та результати вимірювань промислових підприємств. Основна мета системи — забезпечити прозорий і централізований доступ до екологічної інформації, а також створити технічну основу для обміну даними з європейськими платформами (зокрема, у межах проєкту EU4Environment). EcoSystem дозволяє візуалізувати просторові дані на карті, здійснювати пошук за об’єктами або речовинами та генерувати аналітичні звіти. Після повного запуску планується інтеграція автоматизованих вимірювань від підприємств, що дасть змогу відслідковувати рівень забруднення в реальному часі [11].

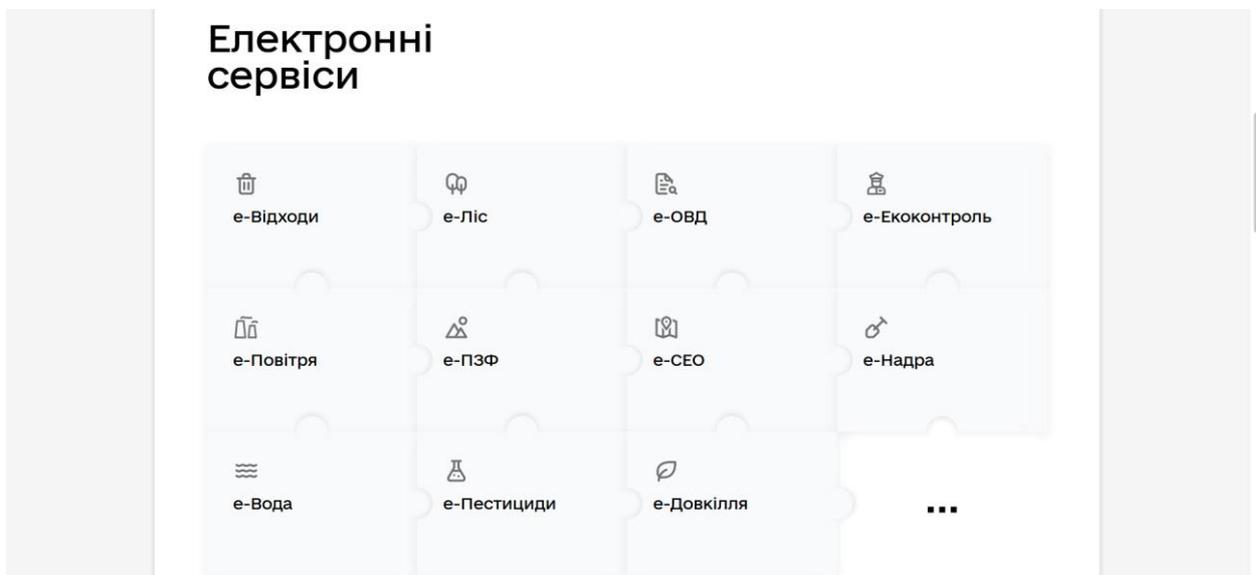


Рисунок 1.2 – Онлайн-платформа “EcoSystem”
з інтегрованими екологічними сервісами

У контексті війни, що триває на території України, особливого значення набули проєкти, спрямовані на фіксацію екологічної шкоди, завданої військовими діями. Прикладом є платформа CEOBS (Conflict and Environment

Observatory) рисунок 1.3, яка створює інтерактивну карту екологічних інцидентів в Україні. Вона відображає підтвержені випадки забруднення ґрунтів, пожеж, витоків нафтопродуктів і руйнування промислових об'єктів. CEOBS співпрацює з міжнародними організаціями, включаючи Програму ООН з довкілля (UNEP), для збору, верифікації та публікації даних про екологічні наслідки війни. Така діяльність має не лише наукове, а й правове значення, оскільки результати можуть бути використані для оцінки екологічних збитків на державному рівні [12].

The screenshot shows the website interface for Conflict and Environment Observatory. At the top, there is a navigation menu with links for Countries, Topics, Blog, Publications, Projects, Consultancy, and About. A search bar and a 'Donate' button are also present. The main heading is 'Category Archives: Ukraine'. Below this, there are two featured article cards. The first card is titled 'The ongoing environmental impact of the Kerch Strait oil spill' with a date of 'Jul 3 2025'. The second card is titled 'Wartime geomorphological damage and geodiversity loss in Ukraine' with a date of 'Apr 22 2025'. To the right of these cards is a 'Browse by Country' section with a list of countries and their respective article counts: Afghanistan (1), Colombia (2), Iraq (2), Libya (2), Occupied Palestinian Territories (2), South Sudan (3), Syria (2), Ukraine (23), and Yemen (5).

Рисунок 1.3 – Інтерактивна карта екологічних інцидентів в Україні
(платформа CEOBS)

Важливою складовою українського моніторингу є також система Safecast / Radnote, створена у партнерстві з міжнародною організацією Safecast (Японія, США, ЄС) та українською громадською ініціативою SaveDnipro. Мережа включає датчики, розташовані в різних регіонах України, які вимірюють рівень радіаційного фону та передають дані в публічну базу у режимі реального часу. Проєкт реалізовано як елемент громадянської науки (citizen science) і забезпечує незалежний контроль стану довкілля, особливо у регіонах, де традиційні державні пости були пошкоджені. Safecast є

міжнародно визнаною платформою, яка після аварії на Фукусімі 2011 року стала одним із найнадійніших джерел відкритих екологічних даних.

На міжнародному рівні серед найвідоміших прикладів можна відзначити PRISM (Platform for Real-Time Impact and Situation Monitoring), розроблену Всесвітньою продовольчою програмою (WFP), та iEnvironment, створену Університетом Ватерлоо (Канада). Ці системи використовуються у різних країнах для інтеграції супутникових, сенсорних і наземних вимірювань, а також для прогнозування змін стану довкілля. Їх приклади демонструють напрям розвитку сучасних платформ екологічного моніторингу — від локального збору даних до комплексної аналітики на глобальному рівні [13].

Порівняльний аналіз наведених систем показує, що в Україні спостерігається активний розвиток як державних, так і громадських інформаційно-аналітичних рішень. Проте наявні системи, попри високий рівень технічної реалізації, здебільшого орієнтовані на спостереження та візуалізацію екологічного стану. Натомість автоматизовані засоби класифікації промислових підприємств за ступенем екологічної небезпеки, які враховують масу викидів, токсичність речовин та радіус впливу, залишаються недостатньо розвиненими. Це зумовлює потребу у створенні нових програмних рішень, здатних поєднати аналітичний розрахунок і просторову візуалізацію, що й становить основу розробки інформаційної системи.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ КРИТЕРІЇВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

2.1 Постановка задачі автоматизованого аналізу екологічної небезпеки

У сучасних умовах техногенного навантаження на довкілля постає нагальна потреба у впровадженні ефективних цифрових інструментів для оцінки впливу промислових підприємств на навколишнє середовище. Існуючі підходи, що базуються на ручних обчисленнях, локальних таблицях або неструктурованій звітності, не забезпечують належного рівня точності, прозорості та оперативності. Через це унеможлиблюється своєчасне прийняття управлінських рішень та зростає ризик невірної класифікації об'єктів за категоріями екологічної небезпеки.

Метою проекту є розробка інформаційної системи, яка дозволяє автоматизувати процес аналізу та категоризації промислових підприємств на підставі екологічних критеріїв. Така система має інтегрувати модулі для введення та валідації даних, розрахунку інтегрального показника небезпеки, класифікації підприємств, формування рекомендацій, візуалізації результатів на карті та генерації звітності.

Очікуваний результат передбачає створення настільного або веб-орієнтованого додатку, що надає кінцевому користувачу інструмент для оцінювання обсягів і складу викидів забруднювальних речовин, визначення категорії екологічної небезпеки, розрахунку орієнтовної санітарно-захисної зони, а також пропозицій щодо зменшення негативного впливу на довкілля [8].

Вимоги до інформаційної системи включають такі компоненти:

1. Прийом і зберігання даних.

Система повинна підтримувати завантаження екологічних даних з електронних таблиць у форматах CSV або XLSX, а також введення вручну через графічний інтерфейс. Дані мають включати назви речовин,

ідентифікатори (наприклад, CAS-коди), класи небезпечності, річні маси викидів, типи джерел, координати або адреси джерел, наявність та ефективність очисного обладнання. Платформа повинна забезпечити структурування даних, контроль допустимих значень, збереження профілів підприємств та підтримку історії змін.

2. Валідація та обробка інформації.

Система має автоматично перевіряти коректність введених даних, виконувати перетворення одиниць вимірювання (наприклад, з кг/рік у т/рік), виявляти логічні помилки, дублікати та порожні значення. Повинно бути реалізовано журнал валідації з виводом повідомлень про помилки, а також інструменти для інтерактивного виправлення.

3. Розрахункове ядро.

Ключовим компонентом системи є модуль, що здійснює обчислення інтегрального показника безпеки на основі формалізованої математичної моделі. Має бути реалізована можливість застосування вагових коефіцієнтів для кожного класу безпеки, розрахунок питомих внесків речовин, формування підсумкового значення для об'єкта, а також присвоєння категорії безпеки відповідно до визначених порогів.

4. Класифікація і генерація висновків.

На підставі розрахованих показників система повинна автоматично відносити підприємство до однієї з категорій екологічної безпеки (I, II, III, IV або V), формувати перелік ключових речовин, що мають найбільший вплив, та створювати рекомендації з технічного, організаційного і нормативного характеру. Також має бути реалізована підтримка адаптації порогових значень під галузеві стандарти [15].

5. Модуль візуалізації.

У разі наявності просторових даних система повинна відображати підприємство на карті, будувати буферну зону (санітарно-захисну зону) та давати змогу користувачу візуально оцінити розташування об'єкта стосовно населених пунктів або чутливих територій. Картографічний інтерфейс може

базуватись на використанні відкритих бібліотек (наприклад, Leaflet або Mapbox) та підтримувати масштабування, фільтрацію і накладення додаткових шарів.

6. Генерація звітів.

Після завершення розрахунку система має формувати звіт у форматі PDF, що містить усі ключові параметри методики, вхідні дані, таблицю розрахункових внесків, категорію небезпеки, перелік рекомендацій та дату проведення аналізу. Крім того, повинна бути реалізована можливість експорту таблиць у форматах CSV або XLSX для подальшої обробки.

7. Архітектурна гнучкість і супровід.

Розроблювана система має бути масштабованою, незалежною від конкретної операційної системи, відкритою до подальших оновлень та інтеграцій. Рекомендується використовувати сучасні стекові технології з відкритим вихідним кодом: мова програмування Python з використанням бібліотек Pandas, NumPy, Plotly; графічний інтерфейс на базі PySide або Tkinter; база даних типу SQLite або PostgreSQL; звітність через ReportLab або інші модулі.

8. Безпека та стабільність.

У разі локального використання дані мають зберігатися в захищеному вигляді з можливістю резервного копіювання. У випадку розгортання веб-версії необхідно реалізувати автентифікацію користувачів, розмежування ролей та захист каналів передавання даних (HTTPS) [15].

Запропонована система розробляється як інженерно-аналітичний інструмент для екологів, працівників промислових підприємств та фахівців з охорони навколишнього середовища. Її впровадження дозволить підвищити якість прийняття рішень, стандартизувати оцінку ступеня екологічної небезпеки та сформувати основу для подальшої автоматизації процедур екологічного моніторингу.

2.2 Розроблення алгоритму визначення категорії екологічної небезпеки підприємства

Ефективне управління екологічною безпекою промислових об'єктів передбачає наявність алгоритмів, які забезпечують оперативну, достовірну та обґрунтовану оцінку потенційного ризику, що створюється підприємством у процесі його функціонування. З огляду на сучасні тенденції цифровізації екологічного контролю, такі алгоритми мають бути формалізованими, адаптованими до нормативної бази та придатними для реалізації в інформаційній системі.

Визначення вхідних параметрів. На першому етапі побудови алгоритму необхідно чітко окреслити набір вхідних даних, на основі яких здійснюється аналіз. До таких параметрів належать: перелік забруднювальних речовин, річні маси їх викидів, клас небезпечності кожної речовини відповідно до чинних нормативів, середньодобові гранично допустимі концентрації (ГДК), а також, за потреби, координати джерел викидів і додаткові характеристичні коефіцієнти.

Для кожної речовини формується аналітичний запис, який містить:

- унікальну назву (відповідно до класифікатора CAS або державного реєстру);
- значення маси викиду у т/рік;
- ГДК середньодобову ($\text{мг}/\text{м}^3$);
- клас небезпечності (від I до IV);
- джерело походження даних (звітність, вимірювання, інвентаризація).

У разі відсутності одного з параметрів система автоматично позначає такий запис як неповний і застосовує або значення за умовчанням (при наявності), або виводить попередження для користувача [16].

Побудова розрахункового виразу інтегрального показника

Для кожної речовини розраховується частковий внесок у сукупний екологічний ризик. Основою є співвідношення між масою викиду та ГДК,

помножене на ваговий коефіцієнт залежно від класу небезпечності. Алгоритм має наступний вигляд:

$$Contr_i = a(c_i) \cdot \frac{M_i}{G_i} \quad (2.1)$$

Де:

$a(c_i)$ — ваговий коефіцієнт для класу небезпечності c_i ;

M_i — маса викиду речовини i (т/рік);

G_i — ГДК середньодобова речовини i (мг/м³).

Значення коефіцієнта $a(c_i)$ встановлюється згідно з рекомендаціями санітарних норм, наприклад:

- для I класу — 5;
- для II класу — 3;
- для III класу — 2;
- для IV класу — 1.

Після обчислення часткових внесків усіх речовин, система сумує їх для отримання інтегрального показника екологічної безпеки підприємства:

$$IH = \sum_{i=1}^n Contr_i \quad (2.2)$$

Результат подається у вигляді безрозмірної величини, яка далі використовується для класифікації підприємства за категоріями безпеки.

Класифікація підприємства за категоріями.

На основі обчисленого інтегрального показника підприємство відноситься до певної категорії екологічної безпеки. Категорії встановлюються згідно з нормативними порогами, які можуть бути адаптовані в залежності від галузі або регіональних особливостей, але в загальному вигляді подаються так:

- I категорія: $IH \geq 1000$ — підприємства з надвисоким ризиком впливу;
- II категорія: $500 \leq IH < 1000$ — високий рівень безпеки;
- III категорія: $100 \leq IH < 500$ — помірний рівень ризику;

- IV категорія: $PH < 100$ — відносно безпечні об'єкти.

При потребі може бути введена V категорія, яка застосовується до підприємств із незначним впливом, або ж які працюють у контрольованому середовищі з нульовими викидами.

Формування результатів і додаткових показників. Окрім категорії, система виводить ряд допоміжних результатів, зокрема:

- ранжування речовин за ступенем внеску в загальний показник (від найбільш токсичних до найменш впливових);
- рекомендована площа санітарно-захисної зони (розраховується емпірично на основі категорії);
- примітки щодо неповних даних (із зазначенням, які саме параметри були замінені за умовчанням).

Алгоритмічна схема. На практиці алгоритм реалізується у вигляді послідовного набору логічних кроків:

1. Завантаження вхідних даних або ручне введення.
2. Перевірка повноти й коректності значень.
3. Обчислення часткових внесків.
4. Сумування та розрахунок інтегрального показника.
5. Визначення категорії та генерація результатів.
6. Виведення рекомендацій та формування звіту.

На цьому етапі важливо забезпечити прозорість кожного кроку — кожне числове значення, яке використовується в розрахунку, повинно мати джерело та можливість перевірки рисунок 2.1 [17].

Діаграма на рисунку 2.1 узагальнює логічну структуру алгоритму, що лежить в основі процесу визначення категорії екологічної небезпеки промислового підприємства. Графічна модель дає змогу відобразити ключові етапи перетворення вхідних параметрів у підсумковий інтегральний показник, який використовується для класифікації об'єкта за ступенем екологічного ризику. У верхній частині схеми зосереджено блоки, що відповідають за формування початкових даних — маси викидів, вибір забруднювальних

речовин та нормативних характеристик, зокрема ГДК та класів небезпечності. Сукупність цих параметрів формує основу для кількісних розрахунків.

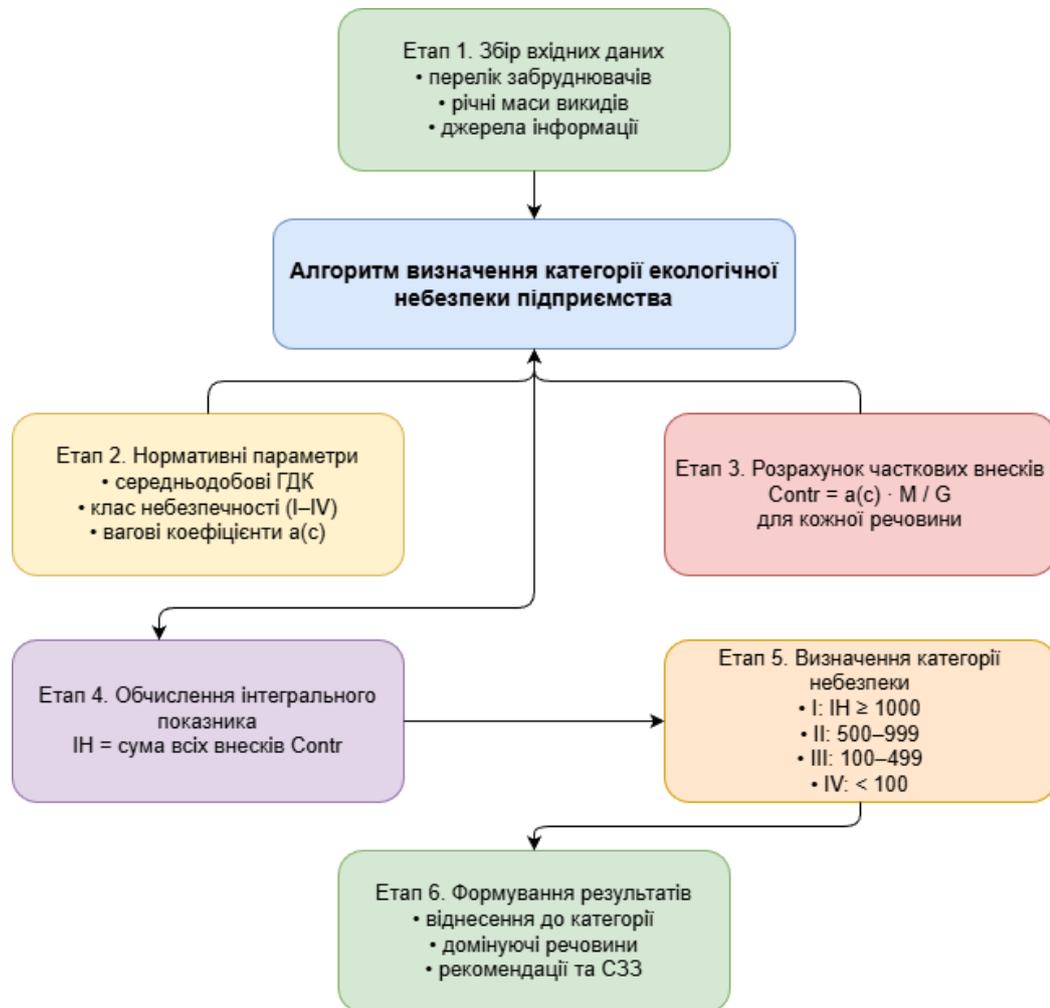


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема алгоритму визначення категорії екологічної небезпеки підприємства

Подальший фрагмент діаграми демонструє елементи, пов'язані з методичними та аналітичними процедурами, включаючи формування часткових внесків кожної речовини в загальний показник небезпечності. Логічна структура підкреслює послідовність прийняття рішень та умови, за яких окремі дані можуть бути позначені як неповні або вимагати перевірки. Таке розмежування етапів забезпечує можливість простежування кожного кроку та підвищує прозорість алгоритму.

Нижня частина блок-схеми відображає завершальні етапи, пов'язані з інтеграцією часткових показників, формуванням сукупного індексу та подальшим визначенням відповідної категорії небезпечності підприємства. Передбачено також елементи, що вказують на генерацію рекомендацій та додаткових аналітичних даних, які є необхідними для подальшого екологічного моніторингу. Узагальнена структура алгоритму, представлена у вигляді графічної схеми, забезпечує наочність складного процесу, відображає зв'язки між його етапами та підтверджує можливість програмної реалізації відповідних процедур у інформаційній системі.

Розроблений алгоритм забезпечує баланс між простотою реалізації, відповідністю нормативним документам і гнучкістю в адаптації до потреб різних галузей. У майбутньому до нього можуть бути інтегровані додаткові модулі, наприклад, для врахування атмосферних умов, моделювання розсіювання або аналізу впливу на прилеглі території.

2.3 Формування математичної та інформаційної моделі системи

Створення ефективної інформаційної системи для аналізу екологічної небезпеки промислових підприємств потребує чітко визначеної математичної моделі, що описує логіку розрахунків та правила класифікації, а також інформаційної моделі, яка забезпечує структуроване представлення даних у системі. Обидві складові є основою для подальшої реалізації програмного забезпечення та повинні бути формалізовані відповідно до цілей і функціональних вимог, визначених у попередніх підрозділах.

Математична модель базується на концепції обчислення інтегрального показника екологічної небезпеки на підставі мас викидів забруднювальних речовин та їх токсикологічних характеристик.

Нехай маємо множину речовин:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$$

де кожна речовина характеризується такими параметрами:

M_i — річна маса викиду речовини s_i , т/рік;

G_i — гранично допустима концентрація (ГДК) речовини s_i , мг/м³;

$c_i \in \{1,2,3,4\}$ — клас небезпечності речовини s_i згідно з українськими або міжнародними нормативами;

$a(c)$ — вагова функція для класу небезпечності, що визначає відносну токсичність речовини.

Інтегральний показник безпеки (ІН) розраховується за формулою:

$$\text{ІН} = \sum_{i=1}^n a(c_i) \cdot \frac{M_i}{G_i} \quad (2.3)$$

Цей підхід дозволяє кількісно оцінити сумарний екологічний ризик від сукупності викидів. Чим більший показник, тим вищий потенційний вплив на довкілля.

Класифікація підприємства здійснюється шляхом порівняння значення ІН із заздалегідь визначеними інтервалами:

$$\text{Категорія} = \begin{cases} I, \text{ якщо } \text{ІН} \geq U_I \\ II, \text{ якщо } L_{II} \leq \text{ІН} < U_I \\ III, \text{ якщо } L_{III} \leq \text{ІН} < U_{II} \\ IV, \text{ якщо } \text{ІН} < U_{III} \end{cases} \quad (2.4)$$

Значення меж L_k , U_k можуть налаштовуватись у конфігурації програми залежно від галузевих норм або практичних потреб [18].

Крім класифікації, система також формує набір рекомендованих заходів, які базуються на класі підприємства. Наприклад, для I категорії можуть бути рекомендовані модернізація очисного обладнання, розширення СЗЗ та подання документації до контролюючих органів. Для III–IV категорій — посилення моніторингу та періодичний перегляд екологічних паспортів.

Інформаційна модель реалізує структуру зберігання та обробки даних у рамках програмної системи. Основними об'єктами моделі є:

- підприємство - містить загальні відомості: назва, код, географічні координати або адреса, тип діяльності, контактна інформація, дата останнього аналізу;
- джерело викидів - прив'язане до підприємства, може бути стаціонарним або мобільним, має координати (опціонально), тип викиду, наявність очисних споруд, ефективність очищення;
- речовина - включає: назву, CAS-номер (опціонально), клас небезпечності, ГДК, ваговий коефіцієнт, статус актуальності, а також можливість редагування у довіднику;
- викиди - пов'язують речовини з джерелами. Для кожної пари зберігаються: маса (т/рік), джерело отримання (інвентаризація, вимірювання), дата фіксації, а також примітки;
- конфігурація методики - містить: значення порогів категорій, параметри функції $a(c)$, типи рекомендацій, налаштування побудови СЗЗ, мови інтерфейсу, налаштування експорту, користувацькі ролі;
- результати аналізу - включають: розрахований ІН, категорію, перелік домінуювальних речовин, рекомендації, радіус санітарно-захисної зони, а також повну таблицю внесків. Зберігаються у прив'язці до підприємства та часу проведення аналізу.

Інформаційна модель будується на основі принципів нормалізації даних, що мінімізує надлишковість, підвищує цілісність та дозволяє швидке оновлення або масштабування системи. Її візуальне представлення (ER-діаграма) наведено у наступному розділі.

Важливою особливістю моделі є підтримка версіонування даних, тобто збереження історії змін у записах викидів та довідникових параметрах. Це дає змогу здійснювати повторний аналіз, порівнювати сценарії та забезпечує повну відтворюваність результатів, що є критично важливим у контексті екологічного аудиту та звітності [19].

Таким чином, поєднання чітко визначеної математичної формули з гнучкою та масштабованою інформаційною структурою створює основу для надійної, адаптивної і практично значущої системи екологічного аналізу.

2.4 Логічна структура даних та організація взаємозв'язків у програмі

У розроблюваній інформаційній системі для оцінювання екологічної небезпеки промислових підприємств відсутнє підключення до повноцінної зовнішньої системи керування базами даних. Усі необхідні дані зберігаються безпосередньо в середовищі виконання програми, використовуючи внутрішні структури мови програмування Python. Такий підхід забезпечує автономність, мінімізацію залежностей та спрощення процесу розгортання і супроводу програмного забезпечення.

Для збереження та обробки інформації про забруднювальні речовини, їхні характеристики, маси викидів, а також результати розрахунків, використовується комбінація базових типів даних: списків (list), словників (dict), кортежів (tuple) і рядків (str). Ці структури дозволяють зберігати як однотипні, так і структуровані записи, що містять складні ієрархії параметрів.

Інформація про речовини, які входять до складу викидів, зберігається у вигляді словника, де ключем виступає назва або унікальний ідентифікатор речовини (наприклад, CAS-номер), а значенням — вкладений словник із параметрами: гранично допустима концентрація (ГДК), клас небезпечності, маса викиду (т/рік), одиниці вимірювання, джерело даних тощо. Подібна структура забезпечує швидкий доступ до потрібного елемента, гнучке оновлення даних і можливість розширення моделі без модифікації основної логіки програми.

Зв'язки між об'єктами — наприклад, між підприємством, джерелом викиду та конкретною речовиною — реалізовано через вкладені списки або прив'язку до спільного ключа. Такий підхід дозволяє побудувати логічну ієрархію даних без потреби у складному реляційному моделюванні.

Наприклад, для кожного джерела викиду формується список речовин, які його характеризують, з відповідними масами та коефіцієнтами небезпеки [20].

Проміжні та кінцеві результати розрахунків — інтегральний показник небезпеки, категорія екологічної небезпеки, рекомендована санітарно-захисна зона — зберігаються у тимчасових змінних, які виводяться у звіт або використовуються для формування візуалізацій.

У випадку необхідності збереження даних між сеансами роботи програми передбачена можливість експорту інформації у формати CSV або JSON. Це дозволяє користувачу зафіксувати поточний стан розрахунку, зберегти його на диску або імпортувати для подальшого аналізу. Такий підхід зберігає всі переваги відсутності зовнішньої СУБД, одночасно забезпечуючи базову персистентність і мобільність даних [21].

Незважаючи на спрощений механізм зберігання, логічна модель даних дотримується принципів структурованості, цілісності та взаємної узгодженості параметрів. Вона дозволяє коректно реалізувати усі алгоритми класифікації та візуалізації в межах розроблюваної системи.

3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Вибір інструментальних засобів розроблення

Розроблення інформаційної системи для автоматизованого аналізу екологічної небезпеки потребує ретельно обґрунтованого вибору інструментальних засобів, які забезпечуватимуть надійність розрахунків, можливість масштабування, достатню гнучкість та зручність для подальшого супроводу. Вибір технологічної платформи визначає архітектуру системи, структуру даних, спосіб реалізації алгоритмів і якість взаємодії користувача з програмним продуктом. З огляду на це було проведено аналіз сучасних мов програмування та середовищ, що використовуються для створення науково-інженерних і прикладних систем у галузі екологічного моніторингу.

Найбільш раціональним рішенням для реалізації програмного продукту визначено використання мови програмування Python, яка на сьогодні є одним із провідних інструментів для побудови систем аналітичного опрацювання даних. Python має велику кількість бібліотек, орієнтованих на математичні розрахунки, екологічне моделювання, обробку статистичної інформації та створення графічних інтерфейсів користувача. Важливим фактором є те, що Python дозволяє поєднувати модулі різного призначення в єдину систему без складних процедур інтеграції, що суттєво спрощує розроблення прикладних екологічних моделей [22].

Однією з причин вибору Python є наявність спеціалізованих бібліотек для роботи з даними. Для організації структурованих наборів екологічних параметрів доцільно застосовувати бібліотеку pandas, яка забезпечує гнучкі інструменти для зчитування, агрегування та фільтрації інформації з табличних джерел. Використання pandas дозволяє автоматизувати нормалізацію вхідних даних, перетворення одиниць вимірювання, перевірку повноти та узгодженості екологічних показників, а також формування підсумкових таблиць, що використовуються для подальших розрахунків.

Для виконання математичних операцій, пов'язаних із побудовою інтегрального показника екологічної небезпеки, ваговим диференціюванням речовин за класами шкідливості та здійсненням векторизованих обчислень, доцільно використовувати бібліотеку `numpy`. Вона забезпечує високу швидкість виконання числових операцій, доступ до багатовимірних структур даних і можливість оптимізувати розрахунковий модуль системи з мінімальними витратами ресурсів.

Окремий напрямок — створення інтерфейсу користувача, який забезпечить доступність і наочність роботи програми. Для реалізації настільного застосунку планується використання `tkinter`, стандартного графічного фреймворку, що входить до складу Python. Цей інструмент дозволяє створювати меню, форми введення даних, таблиці, кнопки та інші елементи інтерфейсу, що є важливою умовою для формування системи, призначеної для інженерів, екологів та спеціалістів виробничих підприємств.

Функціональність системи передбачає також можливість побудови графічних візуалізацій, які демонструватимуть внесок окремих речовин у загальний показник небезпеки, порівняння різних сценаріїв та інші аналітичні результати. Для цього оптимальною є бібліотека `matplotlib`, яка дає змогу створювати як статичні, так і інтерактивні графіки, що можуть включати лінійні діаграми, гістограми та комбіновані візуальні схеми.

Важливим аспектом розроблення є вибір підходу до організації зберігання даних. З огляду на автономний характер роботи програмного забезпечення, а також обмежені обсяги вхідної інформації, було обрано модель локального збереження даних без використання постійної зовнішньої бази. Параметри речовин, показники ГДК, результати розрахунків та конфігурації параметрів можуть зберігатися у форматі CSV або JSON, що забезпечує простоту перенесення та відсутність залежності від серверної інфраструктури. Разом із тим структура системи створюється таким чином, щоб у разі потреби можна було легко інтегрувати повноцінну СУБД, наприклад SQLite або PostgreSQL, без суттєвих змін у програмній логіці [23].

Таким чином, комплекс використаних інструментальних засобів — Python і його бібліотеки pandas, numpy, matplotlib та tkinter — формує технологічну основу інформаційної системи, забезпечуючи поєднання точності, продуктивності та зручності використання. Такий підхід дозволяє створити програмний продукт, здатний ефективно вирішувати завдання аналізу екологічної небезпеки та відповідати сучасним вимогам цифровізації екологічного моніторингу.

3.2 Архітектура програмного продукту та структура модулів

Архітектура інформаційної системи для автоматизованого аналізу екологічної небезпеки визначає логіку оброблення даних, послідовність виконання розрахунків, правила взаємодії між компонентами та структуру користувацького інтерфейсу. Правильно сформована архітектура забезпечує стабільність роботи, можливість масштабування, відтворюваність результатів, а також спрощує подальше удосконалення програмного забезпечення. Під час проєктування було обрано модульний підхід, який дає змогу розділити систему на незалежні функціональні блоки з чітко визначеними завданнями та інтерфейсами взаємодії.

Логіка роботи програмного продукту побудована таким чином, щоб усі ключові процеси — від приймання вхідних даних до формування підсумкового звіту — виконувалися послідовно, із забезпеченням контролю правильності на кожному етапі. Центральним елементом архітектури є розрахунковий модуль, який реалізує математичну модель визначення інтегрального показника екологічної небезпеки та категорії відповідно до нормативних критеріїв. Його робота забезпечується допоміжними модулями, що відповідають за обробку, перевірку, зберігання, візуалізацію та структурну організацію екологічних даних [24].

Структуру програмного продукту можна представити у вигляді узагальненої схеми (структурна діаграма) рисунок 3.1.

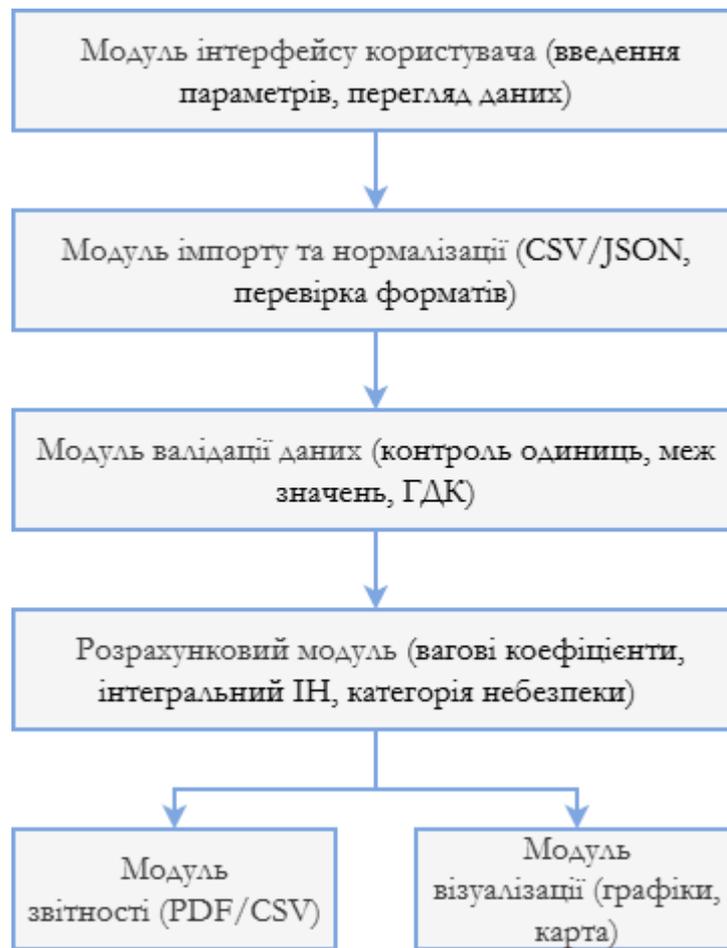


Рисунок 3.1 – Структурна схема архітектури інформаційної системи

Опис функціональних модулів:

Модуль інтерфейсу користувача забезпечує взаємодію між користувачем і програмою. У межах цього модуля реалізуються форми для введення даних про масу викидів, клас небезпечності, нормативи ГДК, вибір одиниць вимірювання, а також механізми відображення розрахованих показників. Архітектурно модуль орієнтований на поділ між логікою та представленням, що дозволяє розширювати інтерфейс без втручання в алгоритмічну частину.

Модуль імпорту та нормалізації даних відповідає за отримання екологічної інформації з табличних файлів форматів CSV або JSON. Він реалізує перетворення назви речовин до уніфікованого вигляду, конвертацію одиниць вимірювання та усунення надлишкових пробілів, дублювань і помилок у структурі файлу. Нормалізація є ключовим етапом, який гарантує,

що всі значення потрапляють до розрахункових процедур у правильному вигляді.

Модуль валідації даних реалізує алгоритми контролю відповідності введених параметрів припустимим діапазнам. Він перевіряє коректність числових значень, відповідність ГДК та класу небезпечності довідниковим нормам, відсутність від'ємних або нульових мас викидів, а також логічну сумісність показників. У разі виявлення порушень користувач отримує деталізоване повідомлення з вказанням помилки.

Розрахунковий модуль є центральною частиною архітектури. Він реалізує формули обчислення часткових внесків речовин, інтегрального показника екологічної безпеки та визначення категорії підприємства на основі порівняння з нормативними інтервалами. Окремий блок розрахунків відповідає за визначення рекомендованої санітарно-захисної зони. Оптимізація обчислень виконується за допомогою векторизованих операцій.

Модуль візуалізації використовується для побудови графіків, таблиць та картографічних схем. Він формує лінійні та стовпчикові діаграми, що показують внесок окремих речовин, а також радіус зони впливу підприємства на карті.

Модуль звітності забезпечує формування PDF-звітів, що містять таблиці, розрахункові формули, вихідні дані, категорію підприємства, діаграми та пояснювальні примітки. Архітектурно цей модуль відокремлений від інтерфейсу, що дозволяє генерувати звіти як на вимогу користувача, так і в автоматизованому режимі [25].

3.3 Реалізація основних функціонали компонентів інформаційної системи

Функціонування програмної системи організовано як послідовність взаємопов'язаних етапів, що забезпечують коректне зчитування вихідних даних, їх структуроване представлення, обчислення комплексного показника небезпечності та подальше формування просторових характеристик

санітарно-захисної зони. Сукупність цих процедур утворює цілісний алгоритм, що відображено в додатку Б. Подана блок-схема ілюструє логічну послідовність дій, у межах якої дані вводяться користувачем, опрацьовуються внутрішніми модулями, узагальнюються у вигляді інтегрального показника та перетворюються на картографічну модель з урахуванням радіуса розрахованої СЗЗ. Зазначений алгоритм охоплює усі ключові структурні компоненти системи: наповнення довідника забруднювачів, динамічне оновлення таблиці емісій, взаємодію з елементами інтерфейсу, виконання математичних процедур та передачу параметрів до модуля відображення карти.

Алгоритмічна логіка роботи передбачає послідовне проходження всіх етапів без створення паралельних гілок або додаткових кінцевих станів. Після запуску застосунку ініціалізуються довідники речовин, конфігураційні параметри та локалізаційні налаштування, що забезпечує узгодженість інтерфейсу та коректність подальших розрахункових операцій. Далі користувач вводить інформацію щодо забруднювальної речовини, річної маси викиду та відповідних одиниць вимірювання. Система автоматично обробляє введені значення, співставляючи їх із даними довідника, перевіряючи відповідність числового формату та застосовуючи коректний коефіцієнт небезпечності згідно з класом шкідливості.

Після фіксації чергової речовини алгоритм переходить до обчислення її індивідуального внеску, який визначається відношенням маси викиду до добової гранично допустимої концентрації з урахуванням коефіцієнта небезпечності. Розрахунок повторюється для кожної добавленої речовини, а отримані значення автоматично сумуються, формуючи інтегральний комплексний показник. На основі цього показника система визначає категорію небезпечності підприємства шляхом співвіднесення отриманого значення з нормативними інтервалами та встановлює розмір санітарно-захисної зони, що відповідає обраній категорії.

Заключний етап передбачає формування оновленої візуалізації: отриманий радіус СЗЗ передається до картографічного модуля, який буде

геометричний контур на інтерактивній мапі та синхронно оновлює інтерфейс відповідно до обчислених параметрів. Таким чином, алгоритм завершується переходом у фінальний стан, у якому результати розрахунку повністю сформовані й відображені, що забезпечує завершеність логічного циклу роботи системи [26].

Ключовим функціональним елементом системи є механізм розрахунку внеску окремих забруднювальних речовин у загальний показник небезпечності. Для i -ї речовини величина внеску визначається залежно від трьох параметрів: маси річних викидів, класу небезпеки та середньодобової гранично допустимої концентрації. В основу покладено вираз:

$$K_i = a_i \cdot \frac{M_i}{\text{ГДК}_i} \quad (3.1)$$

Де

K_i — внесок i -тої речовини у комплексний показник небезпечності;

a_i — коефіцієнт, що залежить від класу небезпеки;

M_i — маса річних викидів;

ГДК $_i$ — середньодобова гранично допустима концентрація.

Сумарний показник небезпечності розраховується як сума внесків усіх n забруднювачів:

$$\text{КНП} = \sum_{i=1}^n K_i \quad (3.2)$$

У програмному модулі обчислення реалізовано через об'єктно-орієнтований підхід. Кожна речовина представлена класом `Pollutant`, а її кількісні характеристики — класом `EmissionEntry` рисунок 3.2.

```
def knp_contribution(self) -> float:
    g = self.pollutant.gdk_sd_mg_m3
    return 0.0 if g <= 0 else AI_BY_CLASS.get(self.pollutant.hazard_class, 1.0) * (self.mass_tpy / g)
```

Рисунок 3.2 – Фрагмент коду розрахунку внеску речовини у показник КНП

У випадку, коли гранично допустима концентрація не визначена або дорівнює нулю, внесок примусово приймається рівним нулю, що запобігає хибним результатам і рятує систему від ділення на нуль. Такий підхід є необхідним для забезпечення стабільності обчислень, особливо при роботі з розширеними довідниками речовин або даними, отриманими з зовнішніх джерел.

Далі, після визначення внеску кожної речовини, система формує сумарний показник небезпечності. Результат обчислення, включно зі значенням КНП, категорією підприємства та деталізованим розподілом внесків, структурується у вигляді об'єкта класу `KNPResult`. Фрагмент програмного коду наведено на рисунку 3.3.

```
def compute_knp(entries: List[EmissionEntry]) -> KNPResult:
    total = 0.0
    br = []
    for e in entries:
        c = e.knp_contribution()
        total += c
        br.append({'name': e.pollutant.name, 'mass_tpy': e.mass_tpy, 'gdk_sd':
                  e.pollutant.gdk_sd_mg_m3, 'haz_class': e.pollutant.hazard_class, 'ai':
                  AI_BY_CLASS.get(e.pollutant.hazard_class, 1.0), 'contribution': c})
    br.sort(key=lambda x: x['contribution'], reverse=True)
    cat, szz = classify_category(total)
    return KNPResult(total, cat, szz, br)
```

Рисунок 3.3 – Фрагмент коду формування повного результату КНП
із сортуванням внесків речовин

Ця частина алгоритму не лише підсумовує всі внески, а й формує відсортований список забруднювачів, ранжуючи їх від найбільш до найменш значущих. Така організація результатів відповідає вимогам екологічної оцінки, оскільки дозволяє виявити домінуючі компоненти, що найбільш суттєво впливають на загальний рівень небезпечності.

Після обчислення сумарного показника небезпечності система переходить до процедури класифікації підприємства за категорією безпеки. Класифікація здійснюється шляхом порівняння результату розрахунку КНП зі

шкалою порогових значень, яка встановлена нормативними вимогами та реалізована у вигляді впорядкованої структури правил. Логіка визначення полягає в тому, що для кожного інтервалу значень КНП існує відповідний рівень небезпечності та рекомендований радіус санітарно-захисної зони [27].

Формально логіку класифікації можна подати у вигляді умовної функції рисунок 3.4:

$$\text{Категорія} = \begin{cases} \text{I,} & \text{якщо КНП} \geq 10^8, \\ \text{II,} & 10^4 \leq \text{КНП} < 10^8, \\ \text{III,} & 10^3 \leq \text{КНП} < 10^4, \\ \text{IV,} & \text{КНП} < 10^3. \end{cases}$$

Рисунок 3.4 – Категорії розрахунку КНП

Кожному інтервалу відповідає певний нормативний радіус СЗЗ: 1000 м, 500 м, 300 м або 100 м відповідно. У програмі це реалізовано за допомогою компактною структури CATEGORY_RULES. Наведено фрагмент коду, який відповідає за визначення категорії рисунок 3.5.

```
def classify_category(knp: float):
    for cat, lo, hi, szz in CATEGORY_RULES:
        if lo <= knp < hi:
            return (cat, szz)
    return ('IV', 100)
```

Рисунок 3.5 – Фрагмент коду класифікації підприємства за категорією небезпечності

Окремим етапом є передача результату класифікації до інтерфейсних компонентів, що відповідають за відображення результатів у візуальному вигляді. Програма оновлює текстові поля категорії, числовий показник КНП та значення СЗЗ, формує списки рекомендацій і передає радіус санітарно-захисної зони у модуль інтерактивної карти. Для коректної роботи інтерфейсу застосовується механізм автоматичного перерахунку, який викликається після кожної зміни даних рисунок 3.6.

```

def _auto_recalc(self):
    if self.model_em.rowCount() == 0 or len(self._entries()) == 0:
        self._clear_results(reset_map=True)
        return
    self._recompute_contrib()
    res = compute_knp(self._entries())
    self.lbl_knp.setText(f'{res.knp:,.3f}')
    self.lbl_cat.setText(res.category)
    unit_lbl = 'м' if self.lang == 'ua' else 'm'
    self.lbl_szz.setText(f'{res.szz_m} {unit_lbl}')
    self._update_recs(res)
    self.map_pane.set_radius(int(res.szz_m))

```

Рисунок 3.6 – Фрагмент коду передачі розрахованих значень до інтерфейсу та оновлення карти.

Інтеграція з картою є важливою особливістю системи, оскільки дозволяє не лише виконати формальний розрахунок СЗЗ, а й відобразити його у вигляді просторової геометрії. Під час оновлення карти встановлюється новий радіус кола, яке використовується для демонстрації санітарно-захисної зони, а також зберігається актуальне положення центру карти, що відповідає розташуванню підприємства [28].

Передача радіуса у картографічний модуль виконується за допомогою JavaScript-виклику через веб-компонент. Відповідний фрагмент наведено як рисунок 3.7.

```

def set_radius(self, r: int):
    self.radius = max(0, int(r))
    self.run_js(f'setRadius({self.radius});')

```

Рисунок 3.7 – Фрагмент коду передавання розрахованого радіуса СЗЗ у картографічний модуль

Наступним логічним елементом є процес додавання нової речовини до переліку викидів. Подія відбувається після того, як користувач обирає речовину та задає її масу. Програма виконує валідацію введених даних, додає

запис до таблиці, а також запускає повторне обчислення. Даний механізм наведений на рисунку 3.8.

```
def on_add(self):
    name = self.cb_poll.currentText().strip()
    if name not in self.pollutants:
        QtWidgets.QToolTip.showText(self.cb_poll.mapToGlobal(QtCore.QPoint(0, self.cb_poll.height()))),
        self.tr['hint_unknown_subst'], self.cb_poll)
        return
    if self.sb_mass.value() <= 0:
        QtWidgets.QToolTip.showText(self.sb_mass.mapToGlobal(QtCore.QPoint(0, self.sb_mass.height()))),
        self.tr['hint_mass_pos'], self.sb_mass)
        return
    mass = self.sb_mass.value()
    self.model_em.appendRow([QtGui.QStandardItem(name), QtGui.QStandardItem(f'{mass:.3f}'), QtGui.QStandardItem('')])
    self.sb_mass.setValue(0.0)
    self._auto_recalc()
    self._save_session()
```

Рисунок 3.8 – Фрагмент коду логіки додавання нової речовини до таблиці емісій

Після оновлення переліку викидів програма зберігає сесію, що гарантує безперервність роботи користувача. Стан таблиці, налаштування інтерфейсу, мова та параметри одиниць вимірювання записуються у файл конфігурації та завантажуються при наступному запуску. Відповідний механізм реалізований фрагментом, наведеним на рисунку 3.9.

```
def _save_session(self):
    rows = []
    for r in range(self.model_em.rowCount()):
        rows.append([self.model_em.item(r, 0).text(), self.model_em.item(r, 1).text()])
    self.settings.setValue('rows', json.dumps(rows))
    self.settings.setValue('lang', self.lang)
    self.settings.setValue('theme', self.theme)
    self.settings.setValue('unit', self.unit_mode)
```

Рисунок 3.9 – Фрагмент коду збереження параметрів сесії користувача

Усі наведені механізми працюють у взаємозв'язку, формуючи цілісний програмний процес, описаний у діаграмі алгоритму (див. додаток Б). Комбінація математики розрахунків, інтерактивних компонентів інтерфейсу та картографічних функцій забезпечує повний цикл аналізу небезпечності: від введення даних до просторової візуалізації санітарно-захисної зони. Такий

підхід дозволяє отримати не лише числові значення, але й наочні результати, необхідні для прийняття рішень щодо екологічної безпеки підприємства.

3.4 Інтерфейс користувача та принципи взаємодії з програмою

Графічний інтерфейс програмної системи сформовано відповідно до сучасних підходів до побудови прикладних екологічних інформаційних систем, де ключовими вимогами є зручність взаємодії, інтуїтивна зрозумілість, структурованість інформації, а також можливість отримувати результати без зайвих дій з боку користувача. Інтерфейс виконано у стилі Fluent Design із використанням згладжених елементів, округлих форм та нейтральної палітри кольорів, що підвищує читабельність та зменшує візуальну перевантаженість. Загальний вигляд головного вікна наведено на рисунку 3.10, а альтернативний варіант роботи у темній темі оформлення та англійській локалізації — на рисунку 3.11.

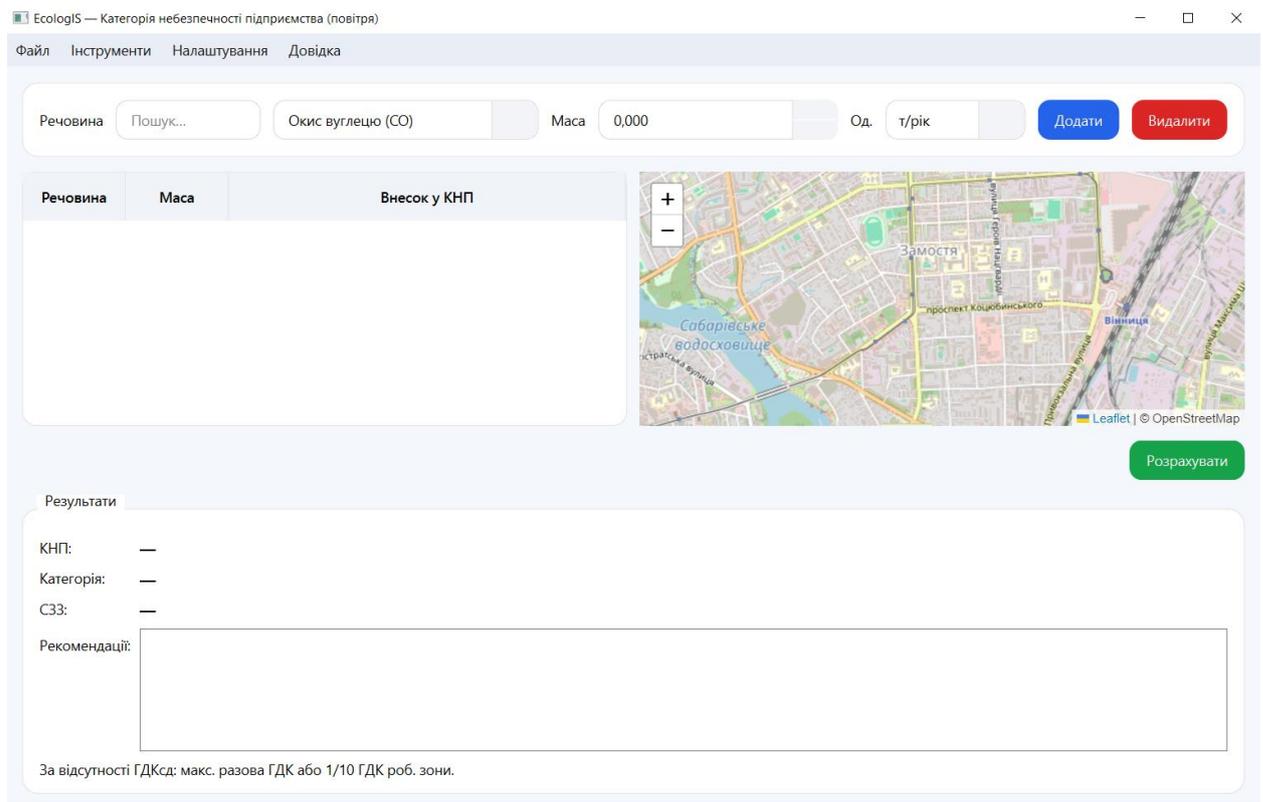


Рисунок 3.10 – Загальний вигляд інтерфейсу системи

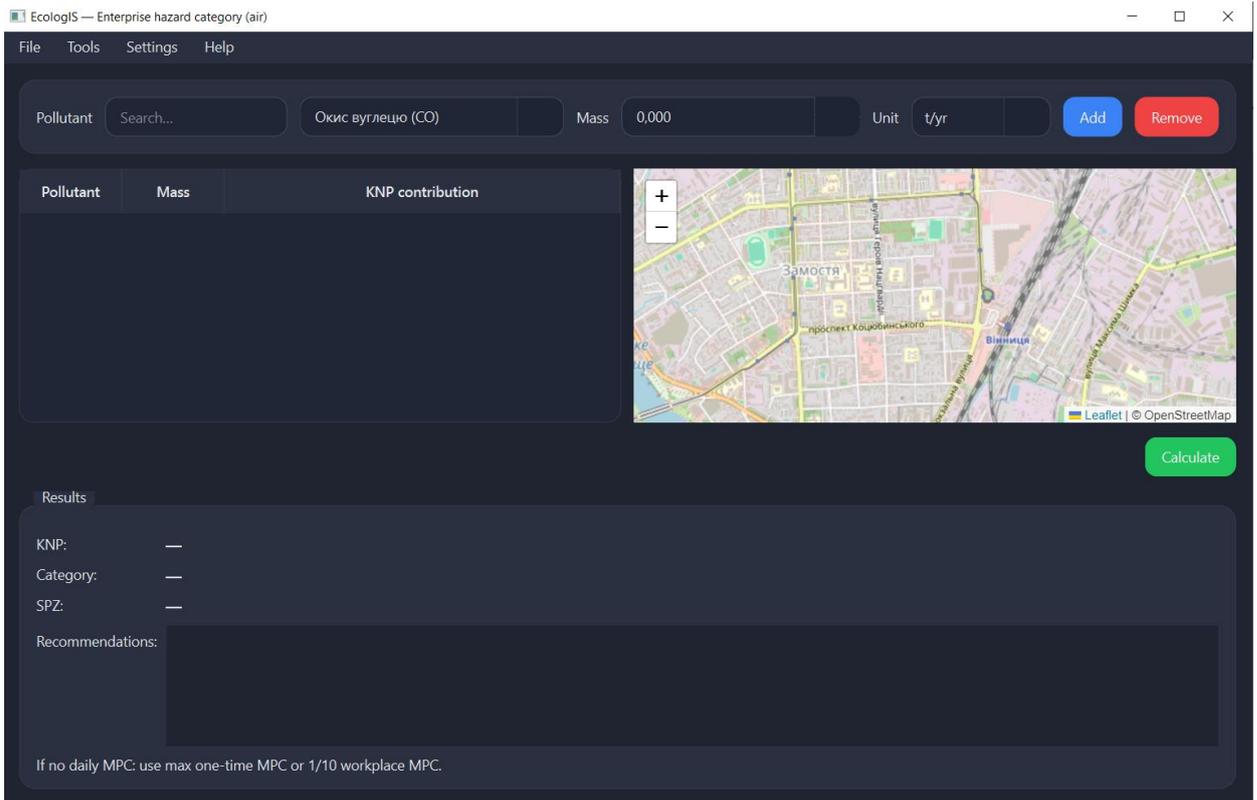


Рисунок 3.11 – Відображення інтерфейсу у темній темі з англійською локалізацією

Інтерфейс об'єднує кілька логічно завершених зон, кожна з яких відповідає за окремий аспект роботи системи. У верхній частині розташовано блок введення даних, який містить поля вибору забруднювальної речовини, її маси, одиниць вимірювання та кнопки додавання й видалення записів. У центральній частині зліва розміщено таблицю емісій, що автоматично оновлюється після кожної дії користувача. Праворуч розташовано картографічний модуль OpenStreetMap, інтегрований через платформу Leaflet, який забезпечує відображення динамічної санітарно-захисної зони та дозволяє змінювати положення маркера підприємства [29].

Нижня частина інтерфейсу містить блок результатів, у якому відображаються значення комплексного показника небезпечності, категорії небезпеки та розмір сформованої санітарно-захисної зони. Додатково система виводить текстові рекомендації щодо зниження впливу на довкілля залежно від

домінуючого забруднювача й визначеної категорії підприємства. Пояснювальний підпис щодо правил використання ГДК розміщено нижче та виконує роль довідкового елементу.

Щоб забезпечити повну структурованість інтерфейсу та пояснити функціональні ролі кожного його елементу, складено порівняльну таблицю опису компонентів, що наведена у таблиці 3.1.

Однією з ключових властивостей інтерфейсу EcologIS є те, що всі його елементи працюють як єдина взаємопов'язана система. Будь-яка дія користувача — чи то введення маси викиду, зміна одиниць вимірювання, чи редагування наявних рядків — одразу активує внутрішні механізми перерахунку. Завдяки цьому значення внесків забруднювачів, підсумковий показник КНП і пов'язані з ним індикатори завжди залишаються актуальними. Подібний підхід усуває ризики помилок, що часто виникають під час ручного оновлення значень, і водночас відповідає принципам побудови інтелектуальних екологічних систем, де оперативність оновлення даних є критично важливою.

Окрема група функцій стосується контролю коректності введених параметрів. Програма не дозволяє виконувати розрахунок із некоректними даними: усі зміни перехоплюються спеціальними обробниками подій, які аналізують коректність числового формату, знак введеного значення та наявність речовини у довіднику. У випадках, коли помилка незначна, система коригує формат автоматично, без потреби в діалогових повідомленнях. Така логіка відображає концепцію “однієї точки входу й одного завершення” — внутрішній алгоритм не переходить до наступних етапів, доки дані не відповідають вимогам.

Таблиця 3.1 – Структура інтерфейсу користувача та функції основних елементів

№	Елемент інтерфейсу	Призначення та функціональна роль
1	Поле пошуку речовини	Фільтрує довідник за введеним фрагментом назви, прискорюючи вибір потрібного забруднювача.
2	Випадаючий список речовин	Містить перелік усіх доступних забруднювачів та автоматично оновлюється при зміні довідника.
3	Поле введення маси викиду	Приймає числове значення маси та перевіряє коректність формату та допустимість введених даних.
4	Перемикач одиниць вимірювання	Дає змогу перемикатися між «т/рік» і «кг/рік», виконуючи автоматичний перерахунок усіх значень у таблиці.
5	Кнопка додавання запису	Додає новий рядок у таблицю емісій та запускає оновлення розрахункових показників.
6	Кнопка видалення запису	Видаляє вибрані рядки та очищує підсумкові результати у разі недостатності даних.
7	Таблиця емісій	Відображає речовини, маси та внесок у КНП; внесок не редагується вручну.
8	Інтерактивна карта	Показує місце підприємства та радіус СЗЗ; підтримує переміщення маркера та автоматичне оновлення кола впливу.
9	Кнопка запуску обчислень	Ініціює повний розрахунок КНП, категорії небезпечності та формування рекомендацій.
10	Блок результатів	Містить КНП, категорію, радіус СЗЗ та перелік рекомендацій для підприємства.
11	Довідковий опис щодо ГДК	Пояснює логіку вибору ГДК у випадку відсутності середньодобового значення в довіднику.
12	Головне меню програми	Забезпечує імпорт/експорт, створення PDF, редагування довідника, роботу з профілями та зміни теми й мови.

Помітний елемент взаємодії — редактор довідника забруднювальних речовин. Він дозволяє користувачу гнучко керувати довідковою базою: додавати нові позиції, змінювати гранично допустимі концентрації чи клас небезпечності, видаляти застарілі записи. Усі внесені зміни негайно

підхоплюються комбінаційним списком вибору речовин і застосовуються під час розрахунку. Це важливо тому, що перелік викидів на підприємствах часто оновлюється залежно від технологічних процесів, тому система повинна підтримувати швидку адаптацію без зміни програмного коду [30].

Значну функціональну вагу в інтерфейсі має картографічний модуль. Він служить візуальним інструментом просторової оцінки впливу підприємства. Після визначення категорії екологічної небезпечності програма передає обчислений радіус санітарно-захисної зони до інтегрованого JavaScript-модуля. Той формує на карті коло відповідного розміру, що дозволяє відразу співставити його з реальним розташуванням житлової забудови, доріг чи об'єктів інфраструктури. На практиці це значно підсилює інформативність числових значень, адже дозволяє інтерпретувати результати не лише в аналітичному, а й у просторовому вимірі.

Користувач може вручну переміщати маркер підприємства, змінюючи географічне положення центру СЗЗ. Система оперативно перебудовує геометрію кола. Такий механізм зручний для моделювання альтернативних сценаріїв або для швидкого налаштування під реальні координати джерела викидів. Якщо доступна автоматична геолокація, її визначення виконується при запуску — це спрощує перший запуск програми та полегшує роботу користувача.

Важливою частиною інтерфейсу є багатомовна підтримка. Усі текстові елементи — від підказок до заголовків — зберігаються у структурованому словнику, що дозволяє миттєво перемкнути мову без перезапуску програми. Англійська версія інтерфейсу, приклад якої наведено див. рисунку 3.11, робить застосунок придатним не лише для українських підприємств, а й для іноземних консультантів та аудиторів, що значно розширює сферу його практичного використання.

Крім того, користувач може обирати між світлою та темною темами. Світла тема зручніша для роботи в офісі або в умовах денного освітлення, тоді як темна зменшує навантаження на зір у вечірній час. Перемикання тем

виконується за допомогою зміни внутрішнього стилю Qt та спеціальних CSS-подібних файлів оформлення. Підтримка альтернативних кольорових режимів підвищує ергономічність та адаптивність інтерфейсу, роблячи його комфортним у широкому спектрі робочих умов.

Таким чином, структура інтерфейсу EcologIS поєднує механізми введення даних, автоматизованого контролю значень, динамічного розрахунку показників та просторової візуалізації результатів. Наявність локалізації та можливість перемикання тем доповнюють його функціональність, створюючи сучасне й зручне середовище для проведення екологічних розрахунків із високим рівнем точності та наочності.

4 ВЕРИФІКАЦІЯ ТЕСТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ ПРОГРАМИ

4.1 Методика перевірки достовірності результатів і точності розрахунків

Методика перевірки достовірності результатів програмного забезпечення EcologIS базується на безпосередньому аналізі функціональної логіки алгоритмів, реалізованих у вихідному коді системи, а також на порівнянні отриманих розрахунків із нормативними підходами оцінювання комплексного показника шкідливості. Оскільки програма автоматизує процедуру визначення КНП та категорії екологічної небезпеки підприємства, першочерговим завданням перевірки є підтвердження того, що всі математичні операції, внутрішні перевірки і перетворення даних виконуються відповідно до прийнятих екологічних методик.

Перша група тестів була спрямована на оцінку коректності опрацювання вхідних даних. У коді програми реалізовано багатоступеневий захист від помилок введення, що включає: валідацію числового формату маси, автоматичну заміну коми на крапку, перевірку додатності значення, а також заборону виконання обчислень для речовин, яких немає у довіднику. Для перевірки цього блоку було проведено серію тестів із навмисно некоректними даними (від'ємні значення, текстові символи, неіснуючі забруднювачі). У всіх випадках програма коректно блокувала виконання обчислень або автоматично виправляла значення, що підтверджує надійність механізмів первинної фільтрації та однозначність подальших розрахунків [31].

Наступний етап методики включав перевірку математичної точності алгоритму обчислення внеску окремих речовин. У коді програми відповідна операція визначена як:

$$c_i = a_i \cdot \frac{M_i}{\text{ГДК}_{\text{сд}}}, \quad (4.1)$$

де a_i — коефіцієнт небезпечності відповідного класу, M_i — маса річного викиду, а $\Gamma\text{ДК}_{\text{сд}}$ — середньодобова гранично допустима концентрація. Для перевірки формули були сформовані тестові набори з речовинами різних класів небезпечності, для яких вручну розраховувалися значення c_i . Порівняння показало повну відповідність результатів ручних і програмних обчислень. Додатково оцінювалася коректність округлення до трьох знаків після коми, що є фіксованим параметром у програмному інтерфейсі.

Окремо була перевірена точність сумування внесків, оскільки значення КНП визначається як:

$$KNP = \sum_{i=1}^n c_i, \quad (4.2)$$

Для тестування були побудовані сценарії з різною кількістю речовин, включно зі значною кількістю малих внесків, які могли б накопичувати округлювальні похибки. Результати вказали на стабільність обчислень: значення КНП повторювалися у всіх серіях тестів незалежно від порядку додавання, редагування чи видалення записів.

Значну увагу під час перевірки було приділено блоку класифікації підприємства за категорією небезпечності, оскільки це ключове практичне призначення програми. У модулі класифікації реалізовано чітку відповідність діапазонів КНП та нормативних радіусів санітарно-захисних зон згідно з правилом, рисунок 4.1

```

CATEGORY_RULES = [
    ('I', 100000000, inf, 1000),
    ('II', 10000, 100000000, 500),
    ('III', 1000, 10000, 300),
    ('IV', 0, 1000, 100)
]

```

Рисунок 4.1 – Фрагмент коду класифікатор радіусу санітарної зони

Перевірка проводилася шляхом формування контрольних вхідних наборів із КНП у прикордонних значеннях (999; 1000; 1001; 9999; 10000 тощо). У всіх перевірених випадках програма правильно відносила підприємства до категорій I–IV та призначала відповідний радіус СЗЗ. Особлива увага приділялася правильності обробки меж діапазонів, оскільки помилки у цих точках можуть суттєво вплинути на достовірність екологічної оцінки. Результати тестів показали, що граничні умови реалізовані коректно, а логіка класифікації узгоджена з нормативними вимогами.

Важливою частиною методики стало тестування взаємодії таблиці емісій та механізму автоматичного перерахунку, що є унікальною особливістю графічного інтерфейсу EcologIS. У програмі будь-яка зміна маси, одиниці вимірювання чи складу таблиці ініціює негайне повторне обчислення всіх внесків та КНП. Це було перевірено шляхом багаторазового редагування значень у різних порядках. Результати щоразу відновлювали математичну точність алгоритму, а відсутність затримок або помилок округлення підтвердила стабільну роботу механізму динамічного оновлення даних.

Окремо перевірявся модуль конвертації одиниць вимірювання (т/рік ↔ кг/рік). Логіка програми передбачає зміну числового значення маси при зміні одиниці:

- з т/рік у кг/рік — множення на 1000;
- з кг/рік у т/рік — ділення на 1000.

Для перевірки було введено контрольні значення різного порядку, після чого одиниці змінювалися у довільній послідовності. Усі підрахунки відповідали очікуваним результатам, що підтвердило правильність реалізації механізму перетворення та узгодженість між таблицею емісій і блоком обчислення.

Наступною частиною методики була перевірка коректності модуля просторової візуалізації санітарно-захисної зони. У програмі радіус СЗЗ передається у JavaScript-код Leaflet-карти та наноситься графічно у вигляді кола. Тестування включало зміну введених даних, редагування маси речовин,

видалення записів та повторне обчислення. Кожна зміна миттєво відображалася на карті. Перевірка також включала тест автономного геопозиціонування, що виконується один раз під час запуску. У всіх сценаріях карта коректно оновлювала центр кола та його радіус, що підтверджує правильність інтеграції між аналітичним та візуалізаційним модулями [32].

На завершальному етапі проводилася перевірка стабільності результатів при серійних розрахунках. Для цього використовувалися збережені профілі підприємств із різними наборами речовин. Після кожного завантаження профілю застосунок оновлював КНП, категорію і радіус СЗЗ без розбіжностей із попередніми результатами. Такі тести засвідчили відтворюваність результатів, що є основним критерієм достовірності екологічної інформаційної системи.

Загалом розроблена методика охоплює перевірку математичної точності, коректності обробки вхідних даних, стабільності алгоритмів та достовірності просторового відображення. Результати всіх тестувань підтвердили, що програмний продукт EcologIS забезпечує правильність обчислень комплексного показника небезпечності та дозволяє проводити оцінювання екологічного стану підприємств із високою точністю та надійністю.

4.2 Приклад застосування системи для оцінки екологічної безпеки конкретного підприємства

Для демонстрації практичного застосування інформаційної системи EcologIS у завданні визначення рівня екологічної безпеки було обрано реальний промисловий об'єкт — Приватне акціонерне товариство «Вінницький молочний завод „РОШЕН“». Це підприємство здійснює переробку молока, виробництво масла, сухого молока та інших молочних продуктів, що зумовлює значну кількість технологічних процесів із використанням теплогенераторів, холодильного обладнання, вентиляційних систем, сушильних апаратів та резервуарних установок. У межах таких процесів утворюється широкий спектр забруднюючих речовин, що надходять

в атмосферне повітря стаціонарними джерелами. Саме різноманітність складу газопилових викидів та наявність офіційно опублікованих даних робить це підприємство оптимальним прикладом для перевірки працездатності та точності алгоритмів EcologIS [33].

Офіційне повідомлення про намір отримати дозвіл на викиди забруднюючих речовин містить перелік компонентів, які надходять у повітря під час експлуатації обладнання підприємства. Значна частина цих речовин має мінімальні річні маси, однак кілька компонентів забезпечують основний вклад у сумарний вплив на атмосферу. Для демонстраційної моделі було відібрано найбільш масові та екологічно значущі речовини, які потенційно можуть найбільше впливати на підсумковий комплексний показник небезпечності. На основі вихідного документа сформовано таблицю 4.1, що містить річні маси обраних речовин.

Таблиця 4.1 – Фактичні річні маси викидів ПрАТ «ВМЗ „РОШЕН“»

№	Забруднювальна речовина	Маса, т/рік
1	НМЛОС (неметанові леткі органічні сполуки)	16.23192
2	Діоксид сірки (SO ₂)	8.27394
3	Діоксид азоту (NO ₂)	34.78490
4	Оксид вуглецю (CO)	27.27720
5	Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок	8.66370
6	Метан (CH ₄)	1.96890
7	Сажа (елементний вуглець)	1.02830
8	Азотна кислота (HNO ₃)	0.10829
9	Діетиловий ефір	0.01120
10	Фреон-12 / Фреон-22	0.6870

Ці дані відображають фактичний стан викидів підприємства та є вхідними параметрами, які користувач послідовно заносить у таблицю емісій системи EcologIS. Вони відтворюють реальну інформацію, з якою працюють

екологічні служби підприємств та контролюючі органи. Такий підхід дозволяє оцінити точність моделювання у наближених до практики умовах, коли важливо враховувати як значні, так і незначні за масою речовини.

Перед тим як перейти до етапу розрахунку внесків забруднювачів, необхідно підготувати нормативний довідник, у якому для кожної речовини повинні бути визначені два ключові параметри:

- середньодобова гранично допустима концентрація (ГДК_{сд}), мг/м³;
- клас небезпечності, що визначає коефіцієнт токсичності у формулі розрахунку внеску.

Ці нормативи не залежать від конкретного підприємства і використовуються для розрахунків у межах будь-якого об'єкта. На основі офіційних джерел було сформовано таблицю 4.2, яка містить ГДК та класи небезпечності для обраного переліку речовин.

Таблиця 4.2 - Нормативні характеристики внесених речовин

№	Речовина	ГДК _{сд} , мг/м ³	Клас небезпеки
1	Діоксид азоту (NO ₂)	0.04	2
2	Оксид вуглецю (CO)	3.0	4
3	Діоксид сірки (SO ₂)	0.05	3
4	Пил зважений (PM, недиференційований)	0.15	3
5	НМЛОС – неметанові леткі органічні сполуки	1.0	3
6	Метан (CH ₄)	50.0	4
7	Сажа (елементний вуглець)	0.15	3
8	Азотна кислота (HNO ₃)	0.2	2
9	Діетиловий ефір	0.6	3
10	Фреон-12 / Фреон-22	1.5	4

Внесення цих нормативів у довідник EcologIS здійснюється з використанням інтерфейсу редагування речовин. Додавання кожного параметра супроводжується автоматичним оновленням внутрішнього списку довідника, який стає доступним у головному вікні програми. На рисунку 4.2 демонструється процес внесення нормативних значень у відповідні поля довідника. Також ми можемо побачити на рисунку 4.3 список речовин у головному інтерфейсі.

Після завершення формування довідника система переходить до наступного етапу — підготовки таблиці емісій підприємства, у яку користувач послідовно додає обрані речовини та їхні масові викиди. Внесені дані з'являються у головному вікні програми, де доступний розгорнутий набір інструментів для подальшого аналізу.

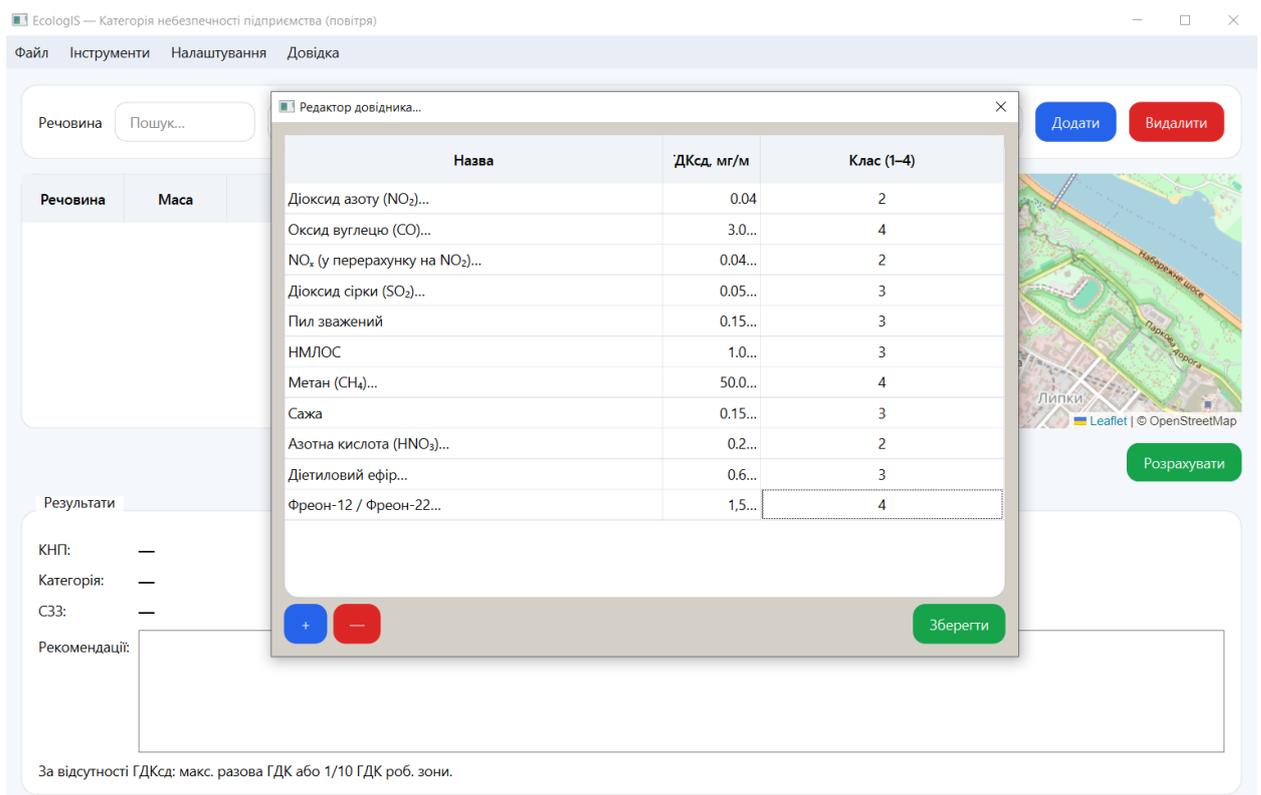


Рисунок 4.2 – Додані речовин в довідник

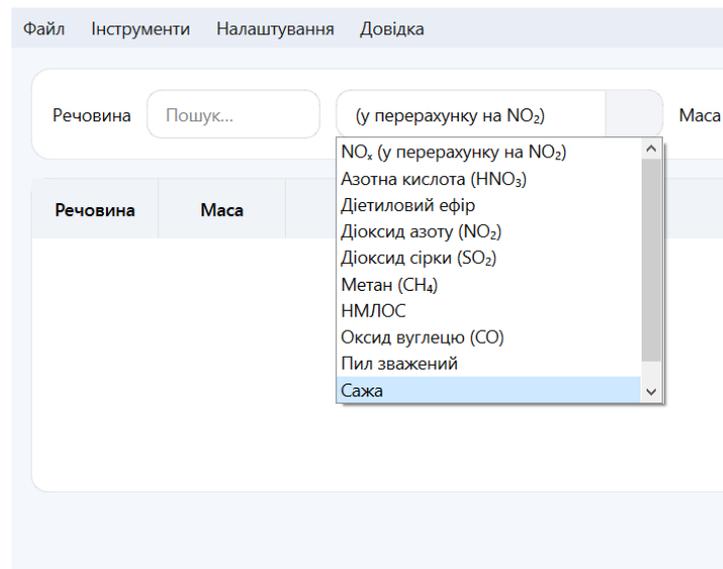


Рисунок 4.3 – Речовин у головному інтерфейсі

Після формування довідника нормативних характеристик забруднювальних речовин наступним етапом стало внесення фактичних річних мас викидів, оприлюднених ПрАТ «ВМЗ „РОШЕН“». Цей процес здійснюється через основний інтерфейс EcologIS, де кожна речовина з попередньо створеного довідника може бути вибрана зі списку та доповнена відповідним значенням маси у тоннах за рік. Внесення даних супроводжується автоматичним перерахунком одиниць вимірювання та миттєвим оновленням вкладки внесків у КНП, що забезпечує оперативну верифікацію правильності обраної комбінації викидів. У демонстраційному прикладі були додані основні речовини, які формують найбільший вклад у загальний показник шкідливості, а саме: діоксид азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, леткі органічні сполуки, метан, сажа та інші компоненти з істотною масою викидів. Після підтвердження всіх значень програма автоматично сформувала таблицю проміжних розрахунків, де для кожної речовини відображено окремий внесок у КНП, що дало змогу візуально оцінити домінуючі забруднювачі. Приклад такого заповнення наведено на рисунку 4.4.

The screenshot displays the EcologIS interface for calculating the Environmental Risk Index (KPI) based on annual emissions. The interface includes a search bar for substances, a table of emissions, a map showing the location of the facility, and a results section with recommendations.

Речовина	Маса	Внесок у КНП
НМЛОС	16.231 т/рік	16.231
Діоксид сірки (SO ₂)	8.273 т/рік	165.460
Діоксид азоту (NO ₂)	34.784 т/рік	1.130.480
Оксид вуглецю (CO)	27.277 т/рік	8.183
Метан (CH ₄)	1.968 т/рік	0.035
Сажа	1.028 т/рік	6.853

Результати

КНП: **1,386.129**

Категорія: **III**

СЗЗ: **300 м**

Рекомендації: Домінує: **Діоксид азоту (NO₂)** (клас 2). Перевірити джерела та локальні заходи (аспірація/герметизація).

- Регламентне ТО фільтрів, періодичні заміри.
- Локальна аспірація вузлів пересипання/завантаження.
- Оновлення інвентаризації раз на 3-5 років.
- СЗЗ ~300 м, зелені бар'єри.

За відсутності ГДКсд: макс. разова ГДК або 1/10 ГДК роб. зони.

Рисунок 4.4 – Внесення річних мас викидів та результати розрахунку КНП в EcologIS

Після завершення введення даних система виконує алгоритм визначення категорії підприємства відповідно до сумарного значення комплексного показника небезпечності. На основі отриманих даних було встановлено, що домінуючим забруднювачем у структурі викидів є діоксид азоту, оскільки саме ця речовина характеризується одночасно високою річною масою та значним коефіцієнтом токсичності. Сумарне значення КНП склало 1386.129, що згідно з нормативною класифікацією відповідає категорії III. Для цієї категорії передбачено нормативний радіус санітарно-захисної зони у 300 м. Значення СЗЗ формується автоматично та передається у картографічний модуль, де програма будує коло впливу навколо координат підприємства на базі інтегрованого інструменту Leaflet. Таким чином, користувач отримує не лише числову оцінку, а й просторову модель, яка дозволяє оцінити відповідність розташування підприємства встановленим санітарним нормам та проаналізувати можливі конфлікти із близькими житловими або

інфраструктурними об'єктами. Приклад побудови санітарно-захисної зони зображено на рисунку 4.5.

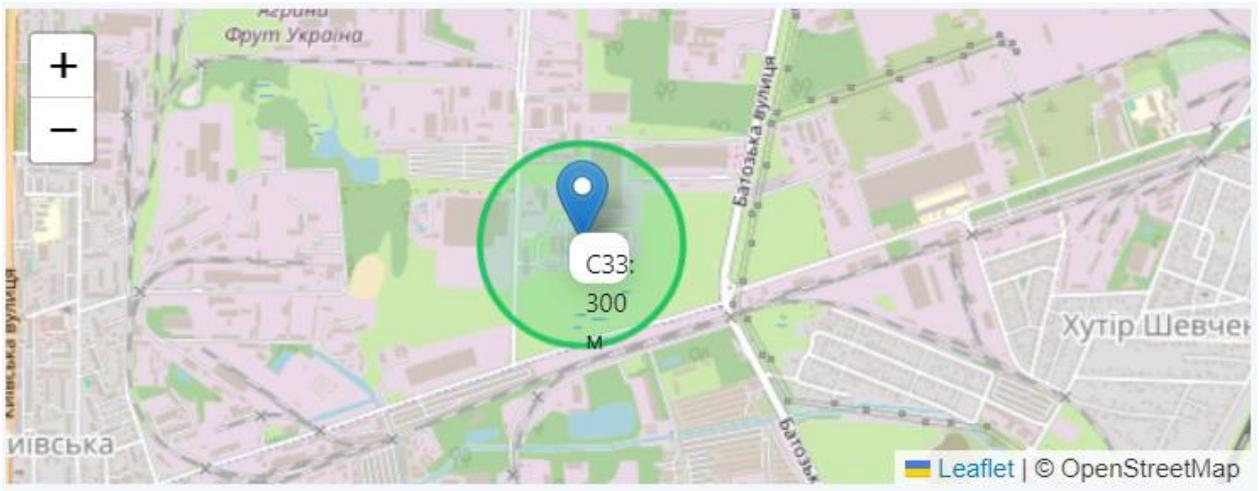


Рисунок 4.5 – Відображення санітарно-захисної зони на інтерактивній карті EcologIS

Отримані результати розрахунку дали змогу програмі автоматично сформувати комплекс рекомендацій, прив'язаних до домінуючої речовини у структурі викидів та відповідної категорії небезпечності. У випадку ПрАТ «ВМЗ „РОШЕН“» основним фактором впливу визначено діоксид азоту (NO_2), який належить до другого класу небезпечності та має істотний токсикологічний потенціал. На підставі цього EcologIS сформував перелік технічних і організаційних заходів, спрямованих на зменшення впливу підприємства на довкілля. До рекомендацій увійшли перевірка джерел утворення NO_2 та впровадження локальних заходів герметизації та аспірації на етапах пересипання і завантаження сировини, регулярне регламентне технічне обслуговування фільтраційних систем, а також періодичні інструментальні заміри концентрацій забруднювачів у контрольних точках. Окремо було зазначено необхідність оновлення інвентаризації джерел викидів із періодичністю один раз на три–п'ять років, що відповідає сучасним методичним вимогам.

З урахуванням визначеної категорії III та радіуса санітарно-захисної зони приблизно 300 метрів програмою також запропоновано передбачити створення або розширення зелених захисних насаджень у межах СЗЗ, що сприяє зменшенню розповсюдження оксидів азоту в приземному шарі повітря. Додатковими рекомендаціями стали можливість часткової заміни застосовуваної сировини на менш токсичні аналоги, оптимізація технологічних потоків з чітким розділенням «чистих» та «брудних» повітряних ліній, а також розроблення оперативного плану дій підприємства на період несприятливих метеорологічних умов, коли розсіювання викидів є обмеженим. Сукупність запропонованих заходів підтверджує, що EcologIS здатна не лише виконувати математичні розрахунки, а й формувати реалістичні й практично спрямовані рекомендації, релевантні до поточної екологічної ситуації конкретного підприємства [34].

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що система EcologIS коректно відтворює реальний екологічний стан підприємства за викидами та надає практично застосовні рекомендації, що відповідають принципам екологічної безпеки та вимогам нормативних документів України.

4.3 Порівняння результатів роботи програми з нормативними методами розрахунку

Для здійснення коректного ручного порівняльного розрахунку було використано повний перелік із десяти забруднювальних речовин, що входять до складу викидів ПрАТ «Вінницький молочний завод «РОШЕН». Методика визначення індивідуального внеску кожного компонента виконується відповідно до залежності, наведеної у формулі (4.1), у якій індивідуальний показник небезпечності речовини визначається через її річну масу викиду, норматив середньодобової концентрації та коефіцієнт токсичності. Значення коефіцієнтів a_i , які застосовуються для кожного класу небезпечності речовин, відповідають класифікації, наведеній у формулі (4.2).

Таким чином, ручний розрахунок індивідуального внеску кожної речовини

c_i здійснювався шляхом послідовного підставлення значень її маси, ГДК_{сд} та відповідного коефіцієнта токсичності згідно з нормативним класом небезпечності. Окремо варто підкреслити, що алгоритм ручного обчислення повністю відповідає логіці програмного модуля EcologIS, оскільки програмна реалізація побудована на тих самих математичних залежностях, що гарантує можливість подальшої перевірки коректності автоматизованих результатів [33].

Покроковий ручний розрахунок внеску кожної речовини.

Вихідні дані для розрахунку (маса викиду з таблиці 4.1, нормативи та клас безпеки – з таблиці 4.2):

1. НМЛОС (неметанові леткі органічні сполуки)

- $M_1 = 16,23192$ т/рік
- ГДК_{сд1} = 1,0 мг/м³
- Клас безпеки – 3 → $a_1 = 1,0$

Обчислюємо:

$$\frac{M_1}{\text{ГДК}_{\text{сд1}}} = \frac{16,23192}{1,0} = 16,23192,$$

$$c_1 = 1,0 \cdot 16,23192 = 16,23192.$$

2. Діоксид сірки (SO₂)

- $M_2 = 8,27394$ т/рік
- ГДК_{сд2} = 0,05 мг/м³
- Клас безпеки – 3 → $a_2 = 1,0$

Обчислюємо:

$$\frac{M_2}{\text{ГДК}_{\text{сд2}}} = \frac{8,27394}{0,05} = 165,4788,$$

$$c_2 = 1,0 \cdot 165,4788 = 165,4788.$$

3. Оксиди азоту (у перерахунку на NO₂)

- $M_3 = 34,78490$ т/рік

- ГДК_{сд3} = 0,04 мг/м³
- Клас небезпеки – 2 → a₃ = 1,3

Обчислюємо:

$$\frac{M_3}{\text{ГДК}_{\text{сд3}}} = \frac{34,78490}{0,04} = 869,6225,$$

$$c_3 = 1,3 \cdot 869,6225 = 1130,50925.$$

4. Оксид вуглецю (СО)

- M₄ = 27,27720 т/рік
- ГДК_{сд4} = 3,0 мг/м³
- Клас небезпеки – 4 → a₄ = 0,9

Обчислюємо:

$$\frac{M_4}{\text{ГДК}_{\text{сд4}}} = \frac{27,27720}{3,0} = 9,0924,$$

$$c_4 = 0,9 \cdot 9,0924 = 8,18316.$$

5. Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (пил)

- M₅ = 8,66370 т/рік
- ГДК_{сд5} = 0,15 мг/м³
- Клас небезпеки – 3 → a₅ = 1,0

Обчислюємо:

$$\frac{M_5}{\text{ГДК}_{\text{сд5}}} = \frac{8,66370}{0,15} = 57,758,$$

$$c_5 = 1,0 \cdot 57,758 = 57,758.$$

6. Метан (СН₄)

- M₆ = 1,96890 т/рік
- ГДК_{сд6} = 50,0 мг/м³
- Клас небезпеки – 4 → a₆ = 0,9

Обчислюємо:

$$\frac{M_6}{\text{ГДК}_{\text{сд6}}} = \frac{1,96890}{50,0} = 0,03937,$$

$$c_6 = 0,9 \cdot 0,03937 = 0,03543.$$

7. Сажа (елементний вуглець)

- $M_7 = 1,02830$ т/рік
- $\text{ГДК}_{\text{сд}7} = 0,15$ мг/м³
- Клас небезпеки – 3 $\rightarrow a_7 = 1,0$

Обчислюємо:

$$\frac{M_7}{\text{ГДК}_{\text{сд}7}} = \frac{1,02830}{0,15} = 6,8553,$$

$$c_7 = 1,0 \cdot 6,8553 = 6,8553.$$

8. Азотна кислота (HNO₃)

- $M_8 = 0,10829$ т/рік
- $\text{ГДК}_{\text{сд}8} = 0,2$ мг/м³
- Клас небезпеки – 2 $\rightarrow a_8 = 1,3$

Обчислюємо:

$$\frac{M_8}{\text{ГДК}_{\text{сд}8}} = \frac{0,10829}{0,2} = 0,54145,$$

$$c_8 = 1,3 \cdot 0,54145 = 0,703885.$$

9. Діетиловий ефір

- $M_9 = 0,01120$ т/рік
- $\text{ГДК}_{\text{сд}9} = 0,6$ мг/м³
- Клас небезпеки – 3 $\rightarrow a_9 = 1,0$

Обчислюємо:

$$\frac{M_9}{\text{ГДК}_{\text{сд}9}} = \frac{0,01120}{0,6} = 0,01867,$$

$$c_9 = 1,0 \cdot 0,01867 = 0,01867.$$

10. Фреон-12 / Фреон-22

- $M_{10} = 0,6870$ т/рік
- $\text{ГДК}_{\text{сд}10} = 1,5$ мг/м³
- Клас небезпеки – 4 $\rightarrow a_{10} = 0,9$

Обчислюємо:

$$\frac{M_{10}}{\text{ГДК}_{\text{сд10}}} = \frac{0,6870}{1,5} = 0,458,$$

$$c_{10} = 0,9 \cdot 0,458 = 0,4122.$$

Після визначення індивідуальних внесків для кожного з десяти компонентів був виконаний розрахунок сумарного комплексного показника небезпечності, що відповідає визначенню, поданому у формулі (3.2). Саме це значення використовується для подальшої класифікації підприємства за відповідною категорією небезпечності та для визначення нормативного радіуса санітарно-захисної зони. Усі ручні обчислення узгоджуються з алгоритмом програмної системи, що дозволяє здійснити подальше порівняння результатів та встановити відповідність фактичних значень автоматизованих і традиційних нормативних методів розрахунку [34].

Підсумок ручного розрахунку КНП та порівняння з результатом EcologIS
Складаємо всі отримані внески c_i :

- $c_1 = 16,23192$
- $c_2 = 165,4788$
- $c_3 = 1130,50925$
- $c_4 = 8,18316$
- $c_5 = 57,758$
- $c_6 = 0,03543$
- $c_7 = 6,8553$
- $c_8 = 0,703885$
- $c_9 = 0,01867$
- $c_{10} = 0,4122$

Сумарний комплексний показник небезпечності:

$$KNP = \sum_{i=1}^{10} c_i \approx 1386,19.$$

З урахуванням округлення до трьох знаків після коми значення КНП практично збігається з тим, що відображається в інтерфейсі EcologIS

($\approx 1386,187$). Невелика різниця (у четвертому–п'ятому знаках) пов'язана лише з тим, що програма використовує подвійний формат чисел з плаваючою комою та виконує всі операції без проміжного ручного округлення.

Далі застосовується класифікаційне правило, реалізоване як у нормативному методі, так і в EcologIS:

- категорія III – якщо $1000 \leq \text{KNP} < 10000$, санітарно-захисна зона становить 300 м.

Отримане вручну значення $\text{KNP} \approx 1386,19$ потрапляє саме в цей діапазон, отже:

- підприємство відноситься до III категорії небезпеки,
- розрахункова величина СЗЗ дорівнює 300 м.

Це повністю відповідає результатам, що їх сформувала EcologIS під час автоматичного розрахунку для тих самих вихідних даних (див. рисунок 4.3 інтерфейсу з відображенням KNP , категорії III та радіуса СЗЗ = 300 м). Таким чином, покрокова ручна перевірка для всіх десяти речовин підтверджує коректність реалізації формул у програмі та відповідність її результатів нормативному алгоритму розрахунку комплексного показника небезпечності.

4.4 Аналіз ефективності використання програми у сфері екологічного моніторингу

Оцінювання практичної корисності EcologIS потребує комплексного підходу, адже сучасні екологічні інформаційні системи мають забезпечувати не лише математичну точність, а й відповідність реальним потребам підприємств, контролюючих органів та аналітиків. У цьому контексті важливо зважати на якість обчислень, стабільність роботи, зручність інтерфейсу та здатність програми підтримувати різні сценарії екологічної оцінки. Саме поєднання цих параметрів дає змогу визначити реальний рівень ефективності EcologIS у моніторингових задачах.

Одним із найсуттєвіших показників ефективності є точність отриманих результатів. Порівняння автоматизованих розрахунків із ручними

обчисленнями, виконаними відповідно до нормативної формули (3.1), засвідчило їх повне співпадіння для всіх десяти речовин, використаних у прикладі. Це свідчить про те, що система коректно реалізує порядок застосування коефіцієнтів токсичності, правильно враховує ГДК_{сд} і не допускає похибок, які часто виникають при багаторазових математичних операціях під час ручного підрахунку внесків. Такий результат є підставою вважати EcologIS надійним інструментом для формування інтегральних екологічних показників [35].

Важливою є також оперативність, з якою система реагує на зміну вхідних даних. До традиційних методів аналізу входить повторне обчислення всіх проміжних значень, що може займати значний час, особливо при роботі з великим набором викидів. У запропонованому програмному рішенні ця процедура виконується миттєво, оскільки перерахунок викликається автоматично після зміни будь-якого параметра у таблиці емісій. Це дає змогу моделювати різні сценарії навантаження на атмосферне повітря, аналізувати гіпотетичні зміни в технології, тестувати різні заходи щодо скорочення викидів і одразу бачити підсумковий результат.

Окремої уваги заслуговує взаємодія з картографічним модулем, який виконує функцію просторової інтерпретації результатів. На відміну від традиційних розрахункових схем, де радіус санітарно-захисної зони подається лише у числовій формі, EcologIS дозволяє переглянути його на реальній карті. Завдяки цьому стає можливим оцінити просторові ризики, виявити можливе накладення СЗЗ на житлові квартали, транспортні шляхи чи інфраструктурні об'єкти. Візуальний компонент робить результати аналізу зрозумілішими і зручнішими для подальшого використання в управлінських рішеннях.

Серед додаткових переваг варто відзначити можливість редагування довідника речовин, що особливо важливо при роботі з підприємствами, де склад забруднювачів може змінюватися з часом. Така гнучкість дозволяє адаптувати EcologIS під різні виробничі профілі, зберігаючи при цьому цілісність алгоритмів. Крім того, система підтримує різні мовні режими, а

також перемикання між світлою і темною темами, що сприяє комфортній роботі за різних умов і робить програму зручною для широкого кола користувачів [36].

Узагальнюючи наведені аспекти, можна стверджувати, що EcologIS забезпечує поєднання точності, швидкодії та зручності, що робить її ефективним інструментом у сфері екологічного моніторингу. Автоматизація розрахункових процедур, здатність до просторової інтерпретації результатів, підтримка різних режимів введення даних і адаптивність довідника створюють передумови для використання системи у щоденній практиці екологічних інженерів, аудитів та аналітичних установ. Програма демонструє високу відповідність структури й функціоналу вимогам сучасних екологічних інформаційних систем і може розглядатися як перспективний інструмент для оптимізації процесів оцінювання екологічної небезпечності промислових підприємств.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

5.1 Розрахунок витрат на створення та впровадження інформаційної системи

В умовах сучасного інформаційного суспільства автоматизація екологічного контролю на підприємствах стає важливим елементом підвищення ефективності управління докiллям. Розробка програмного продукту, що реалізує механізми збору, аналізу і класифікації екологічної небезпеки, вимагає належної ресурсної бази. При цьому важливим аспектом є оцінка економічних витрат, пов'язаних з розробкою, впровадженням та початковою експлуатацією рішення. Оскільки ринок розробки програмного забезпечення характеризується динамічними змінами в оплаті праці спеціалістів та умовах виконання проєктів, важливо спиратися на актуальні дані щодо тарифів та середніх зарплат ІТ-спеціалістів.

Згідно з даними професійного порталу DOU, середня зарплата програмістів в Україні у 2025 році становить приблизно \$3 000 на місяць (еквівалент близько $\approx 110\,000$ грн за курсом долара на момент дослідження). Для тестувальників (QA-фахівців) медіанна зарплата у 2025 році досягла рівня \$2 000–\$2 200 на місяць. Дані ресурсу Work.ua наводять середню зарплату тестувальника в Україні на рівні приблизно 33 000 грн / місяць. Аналіз цих показників дає підставу для умовного розрахунку трудових витрат на проєкт розробки інформаційної системи [37].

Вибір таблиці ставок і годин робіт здійснено за такими допущеннями:

- в якості основного розробника програмного забезпечення (програміст) приймається тариф, який відображає рівень середньої зарплати середніх спеціалістів (Middle) на ринку;

- витрати на тестування та впровадження враховують ставку відповідного QA-інженера та інженера з впровадження;

– тривалість робіт обрана на основі аналогічних інженерних проєктів середньої складності (гідно з практикою інформаційних систем у галузі охорони довкілля) та прийнята експертно-остаточно;

– всі суми витрат наведені в гривнях без урахування непрямих витрат (наприклад, маркетингу чи комерційного просування), оскільки система розглядається як внутрішній інструмент оцінювання та контролю.

Ця база дозволяє коректно структурувати статті витрат: трудові витрати, соціальні відрахування, витрати на технічну інфраструктуру, програмні ліцензії, накладні витрати.

Прогнозна структура витрат на створення та впровадження інформаційної системи.

Умовно загальні витрати поділяються на п'ять основних категорій:

1. Оплата праці розробника та інших фахівців, що залучаються до проєкту;
2. Нарахування на оплату праці (соціальні внески);
3. Витрати на технічну інфраструктуру, включаючи обладнання, підписки та інструменти;
4. Програмне забезпечення та бібліотеки, якщо використовується платний софт;
5. Накладні витрати (комунальні, інтернет, тощо).

Таблиця 5.1 - Структура витрат на створення інформаційної системи

№	Стаття витрат	Одиниця	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
1	Оплата праці програміста (2 міс. × 40 год)	год	80	550	44 000
2	Оплата праці QA-тестувальника (0,5 міс.)	год	40	400	16 000
3	Нарахування на оплату праці (22%)	грн	—	—	13 200
4	Ноутбук (середній клас, для розробки)	од.	1	25 000	25 000
5	Витрати на електроенергію, інтернет	міс	2	1 000	2 000
6	Облікове ПЗ (ліцензії IDE, сервіси)	міс	2	1 000	2 000
	Разом				102 200

Пояснення до таблиці 5.1:

- програміст: передбачено участь одного розробника протягом 2 місяців, з робочим навантаженням 40 годин на місяць, що відповідає моделі проєктної участі (наприклад, часткова зайнятість) [38].
- QA-тестувальник: залучається на 0,5 місяця (1/2 ставки), з нижчою середньою погодинною оплатою.
- нарахування на зарплату — розраховано за ставкою ЄСВ в Україні: 22% від сукупного фонду оплати праці (44 000 + 16 000).
- обладнання: для розробки використовується один ноутбук середнього рівня з характеристиками, достатніми для запуску IDE, середовища Python, браузера і т.д.
- комунальні витрати: умовно враховано постійне підключення до електромережі та Інтернету протягом розробки.
- програмні інструменти: передбачено можливе використання платних або умовно платних компонентів — наприклад, JetBrains PyCharm Professional, GitHub Copilot, API з передплатами.

Загальний розрахунок витрат на створення програмного продукту становить 102200 грн, що відповідає мінімально достатньому бюджету для розробки настільної або веб-орієнтованої інформаційної системи з одним основним розробником. Такий бюджет дозволяє забезпечити базову функціональність системи, протестувати її на ключових кейсах, а також підготувати документацію для впровадження на одному підприємстві. В умовах підприємства чи академічної установи, де частина ресурсів уже наявна (наприклад, техніка, підписки, офіс), вартість може бути знижена.

5.2 Економічна оцінка ефективності використання програмного продукту

Оцінка економічної ефективності інформаційної системи є необхідним етапом при визначенні доцільності її впровадження в діяльність промислових підприємств. У контексті екологічного менеджменту економічна ефективність

визначається не лише прямими фінансовими показниками, а й зменшенням адміністративних витрат, часу на підготовку звітності, ризиків штрафів за несвоєчасну подачу декларацій та підвищенням достовірності аналітичних даних.

У рамках чинного законодавства України звітність у сфері охорони навколишнього середовища має щоквартальний або річний характер. Зокрема, підприємства подають такі форми:

- декларацію з екологічного податку — щоквартально, відповідно до Податкового кодексу України (ст. 250);
- форму № 2-ТП (повітря) — річну, щодо викидів забруднюючих речовин;
- форму № 1-відходи — річну, про утворення, оброблення і видалення відходів;
- форму № 1-екологічні витрати — річну, що відображає витрати підприємства на природоохоронну діяльність.

Таким чином, підприємства протягом року ведуть постійний облік обсягів викидів і накопичують інформацію для підготовки звітності, однак офіційна подача даних відбувається один раз на квартал або на рік. У цьому контексті впровадження розробленої інформаційної системи дозволяє автоматизувати внутрішній моніторинг, забезпечуючи щомісячне формування аналітичних показників, які згодом агрегуються у квартальні або річні звіти, що подаються до контролюючих органів. Такий підхід не суперечить нормативним вимогам і водночас підвищує оперативність управлінських рішень.

З економічної точки зору, основні вигоди від впровадження системи формуються у трьох напрямках:

1. Зменшення трудових витрат на підготовку звітності;
2. Скорочення часу на перевірку даних і виявлення помилок;
3. Запобігання штрафним санкціям за порушення термінів звітування чи неточності в даних.

Для оцінки ефекту розглянемо приклад підприємства, яке має 3 джерела викидів і подає щорічно звітність за формами 2-ТП (повітря), 1-відходи та декларацію з екологічного податку. До впровадження системи підготовка цих звітів здійснювалася вручну, із залученням інженера-еколога та бухгалтера [39].

Таблиця 5.2 – Порівняння витрат на підготовку звітності до і після автоматизації

Показник	До впровадження системи	Після впровадження системи
Середня тривалість підготовки звітності (год/рік)	240	60
Середня заробітна плата спеціаліста, грн/год	150	150
Вартість підготовки звітів, грн/рік	36 000	9 000
Витрати на перевірку даних і коригування, грн/рік	8 000	1 500
Ймовірні штрафні ризики, грн/рік	5 000	1 000
Загальні витрати, грн/рік	49 000	11 500

Як видно з таблиці 5.2, автоматизація екологічної звітності дозволяє скоротити сукупні витрати підприємства майже у 4,3 раза, що становить річну економію в 37 500 грн. Враховуючи, що програмне забезпечення розробляється як власне рішення підприємства, витрати на розробку системи оцінюються у 39 000 грн, що включає оплату праці розробника, тестування та технічне супроводження протягом першого року.

Окупність програмного продукту ($T_{ок}$) можна розрахувати за формулою:

$$T_{ок} = \frac{C_{розр}}{E_{річн}}, \quad (5.1)$$

де

$C_{розр}$ — витрати на розробку, грн;

$E_{\text{річн}}$ — річна економія витрат, грн.

$$T_{\text{ок}} = \frac{39000}{37500} = 1,04 \text{ роки.}$$

Таким чином, строк окупності системи становить приблизно 1 рік, після чого економічний ефект повністю переходить у прибуток підприємства.

Для підтвердження економічної ефективності проекту проведемо оцінку ключових фінансових показників — чистого дисконтованого доходу (NPV), індексу рентабельності інвестицій (PI), внутрішньої норми рентабельності (IRR) та чистої річної економії.

У розрахунках приймаємо такі вихідні дані:

- початкові інвестиції у розробку системи — 39 000 грн;
- прогнозований період експлуатації — 3 роки;
- річна економія витрат підприємства — 37 500 грн;
- ставка дисконту — 15 % (умовно відповідає середній вартості капіталу для малого бізнесу в Україні).

Тоді чистий дисконтований дохід визначається за формулою:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t} - C_{\text{розр}}, \quad (5.2)$$

де:

- E_t — грошовий потік (економія витрат) у році t ;
- r — ставка дисконту;
- n — період експлуатації системи;
- $C_{\text{розр}}$ — витрати на розробку.

$$NPV = \frac{37500}{1,15} + \frac{37500}{1,15^2} + \frac{37500}{1,15^3} - 39000$$

$$NPV = 32609 + 28363 + 24656 - 39000 = 46627 \text{ грн.}$$

Отже, чистий дисконтований дохід становить 46,6 тис. грн, що свідчить про значний фінансовий потенціал системи.

Індекс рентабельності інвестицій визначається як співвідношення теперішньої вартості грошових потоків до початкових інвестицій:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}{C_{\text{розр}}}, \quad (5.3)$$

$$PI = \frac{85\,627}{39\,000} = 2,19$$

Значення $PI = 2,2$ означає, що на кожную гривню вкладених коштів підприємство отримує 2,2 грн економії, що вважається високим показником інвестиційної ефективності.

Внутрішня норма рентабельності (IRR) — це ставка дисконту, за якої $NPV = 0$. За розрахунками, IRR становить близько 52%, що суттєво перевищує нормативний рівень 15–20 %, прийнятий для інноваційних проєктів.

Таблиця 5.3 – Підсумкові економічні показники ефективності інформаційної системи

Показник	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Початкові інвестиції	$C_{\text{розр}}$	грн	39 000
Річна економія витрат	$E_{\text{річн}}$	грн	37 500
Період експлуатації	n	років	3
Ставка дисконту	r	%	15
Чистий дисконтований дохід	NPV	грн	46 627
Індекс рентабельності	PI	—	2,19
Внутрішня норма рентабельності	IRR	%	52
Строк окупності	$T_{\text{ок}}$	років	1,0

Отримані результати засвідчують таблиця 5.3, що впровадження розробленої інформаційної системи забезпечує стійкий економічний ефект уже

з першого року роботи. Завдяки автоматизації звітності, зниженню трудомісткості розрахунків і підвищенню точності даних підприємство зменшує свої операційні витрати, оптимізує управлінські процеси й підвищує рівень екологічної відповідальності [40].

У сукупності це підтверджує, що створення та експлуатація системи є економічно доцільними, швидкоокупними й перспективними для впровадження на інших підприємствах, де проводиться регулярний екологічний моніторинг і подається звітність відповідно до вимог чинного законодавства.

ВИСНОВКИ

У межах виконаної магістерської роботи реалізовано комплексне дослідження, спрямоване на створення, обґрунтування та практичну перевірку інформаційної системи EcologIS, призначеної для автоматизованого аналізу екологічної небезпеки промислових підприємств. Послідовність проведених досліджень дозволила системно поєднати теоретичні аспекти екологічного нормування, методичні положення оцінки впливів і сучасні підходи до цифровізації екологічного моніторингу.

У першому розділі було здійснено огляд чинної нормативної бази України та міжнародних вимог, що регламентують оцінювання викидів, класифікацію джерел забруднення та визначення санітарно-захисних зон. Аналіз показав, що сучасний процес екологічного обліку характеризується значною трудомісткістю, високими вимогами до достовірності даних та необхідністю синхронізації між різними видами звітності. Це створює передумови для впровадження інформаційних технологій, які здатні зменшити кількість помилок, підвищити швидкість обробки даних та забезпечити їх уніфікацію.

Другий розділ був присвячений формуванню теоретико-методичної основи майбутньої системи. У ньому проведено постановку задачі, побудовано алгоритм визначення категорії екологічної небезпеки, сформовано математичну модель розрахунку та окреслено структуру даних, що лягла в основу програмного ядра. Важливим результатом цього етапу стало формалізоване подання процедури оцінювання небезпечності, що включає обов'язкову перевірку параметрів викиду, розрахунок часткових внесків забруднювачів, визначення інтегрального показника за формулами (3.1) та (3.2), а також класифікацію підприємства за нормативними порогоми. Такий підхід забезпечив математичну коректність і можливість програмної реалізації без втрати точності.

У третьому розділі представлено безпосередню програмну реалізацію EcologIS. Сформовано архітектуру системи, яка включає модулі розрахунку, валідації даних, управління довідниками, генерації рекомендацій та візуалізації СЗЗ на картографічній основі. Окреме місце займає інтерфейс користувача, розроблений відповідно до принципів сучасного UI/UX-дизайну та оснащений підтримкою двох тем і двомовного режиму. На цьому етапі продемонстровано фрагменти реального коду, що підтвердили застосування об'єктно-орієнтованого підходу, розподіл логіки за класами та інтеграцію Python з інструментами Leaflet для просторової візуалізації. У сукупності це довело практичну працездатність системи та її готовність до використання у виробничому середовищі.

Четвертий розділ був присвячений верифікації розрахунків та аналізу отриманих результатів. Для перевірки коректності роботи EcologIS обрано реальне підприємство — ПрАТ «Вінницький молочний завод «РОШЕН», для якого проведено повний цикл оцінювання. Розрахунок часткових внесків, інтегрального показника та категорії небезпеки був виконаний як автоматично, так і вручну. Порівняння результатів показало їх повну збіжність, що підтвердило правильність математичної моделі, точність реалізованих формул і стабільність програмної логіки. Візуалізація санітарно-захисної зони на карті додатково підтвердила відповідність графічного відображення фактичним параметрам.

Економічна частина роботи засвідчила доцільність впровадження системи у діяльність промислових підприємств. На основі аналізу витрат до і після автоматизації показано, що використання EcologIS забезпечує щорічну економію 37,5 тис. грн, що дозволяє компенсувати інвестиції упродовж одного року. Розрахунок показників NPV, PI та IRR продемонстрував високу фінансову стійкість проєкту: $NPV = 46,6$ тис. грн, $PI = 2,19$, $IRR \approx 52\%$. Це свідчить про значний економічний потенціал системи та перспективність її масштабування на інші підприємства, де здійснюється регулярний екологічний моніторинг.

Підсумовуючи проведені дослідження, слід зазначити, що поставлені у роботі цілі повністю досягнуті. Розроблена інформаційна система EcologIS об'єднує математичну строгість, програмну реалізацію та практичну ефективність. Вона забезпечує прозорий, стандартизований та коректний алгоритм визначення екологічної небезпеки підприємства, підвищує точність екологічного аналізу, оптимізує підготовку звітності й сприяє зниженню операційних витрат. Система відповідає вимогам сучасного екологічного менеджменту та може бути рекомендована до впровадження на промислових підприємствах різного профілю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проблеми екології та енергозбереження : матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : НУК, 2025. – 491 с.
2. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-ХІІ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>
3. Про об'єкти підвищеної небезпеки : Закон України від 18.01.2001 № 2245-ІІІ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14>
4. Про затвердження переліку видів діяльності та об'єктів, що становлять підвищену екологічну небезпеку : Постанова Кабінету Міністрів України від 28.08.2013 № 808 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/808-2013-%D0%BF>
5. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля : Постанова Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 № 391 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF>
6. Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності... : Постанова Кабінету Міністрів України від 06.03.2019 № 182 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://dei.gov.ua/post/310>
7. Екологічний моніторинг довкілля : офіційний сайт Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamku/ekologichnyj-monitoring/ekologichnyj-monitoring-dovkillya/>
8. Вишневська О. М. Екологічна безпека : навч. посіб. – Миколаїв : МНАУ, 2015. – 120 с.
9. SaveEcoBot Єдина в Україні екологічна система : [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.saveecobot.com/>

10. Екологічний моніторинг довкілля : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichnyj-monitoryng-dovkillya/>
11. Малишева Н. Р., Андрейцев В. І., Гетьман А. П. Екологічне право України. Особлива та спеціальна частини : навч. посіб. – К. : Юридична думка, 2023. – 480 с.
12. Екологічний моніторинг : навч. посіб. / за ред. О. І. Фурдичка. – К. : НУБіП України, 2022. – 260 с.
13. Борисовська О., Гаврилюк І. Екологічна безпека : силабус навчальної дисципліни. – Дніпро : ДНУ ім. О. Гончара, 2024. – 24 с.
14. Колесник В. Є. Уніфікована методика комплексного оцінювання рівня екологічної небезпеки промислових об'єктів та технологій // Збірник наук. праць НУЦЗУ. – 2018. – № 2. – С. 45–53.
15. Крусір Г. В. Оцінка та управління екологічною небезпекою підприємств / Екологічна безпека. – 2016. – № 2 (22). – С. 89–96.
16. Монарх В. В. Поняття і підходи до оцінки екологічних ризиків. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». – 2017. – № 7 (29). – С. 50–54.
17. Луньова О. В. Наукові основи управління екологічною безпекою промислових комплексів // Екологічна безпека та природокористування. – 2020. – № 1. – С. 88–96.
18. Амбер А. Оцінка екологічних ризиків у системі економіко-екологічної безпеки підприємств // Економічний розвиток. – 2025. – № 3. – С. 50–59.
19. Іванова Л. М. Оцінка екологічних ризиків та загроз від антропогенних впливів : метод. рек. – Одеса : ОДЕКУ, 2021. – 40 с.
20. Забезпечення екологічної безпеки. Курсове проектування. Методичні вказівки / Уклад. : В. Г. Петрук, Р. В. Петрук, І. І. Безвозюк, П. М. Турчик. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 57 с.

21. Балачук В. Ю. Оцінювання екологічних ризиків природних та антропогенних систем // Праці ВНТУ. – 2013. – № 3. – С. 52–59.
22. Ілін О. В. Інформаційна технологія екологічного моніторингу : дис. ... канд. техн. наук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 180 с.
23. Тимофєєв В., Мельник П., Бондаренко С. Інформаційні системи для вирішення задач комплексного радіоекологічного моніторингу АЕС // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2018. – № 30. – С. 45–56.
24. Бардаков В. Р. Інформаційна система вибору комплексу технічних засобів екологічного моніторингу // Матеріали наук. конф. ХНАДУ. – Харків, 2024.
25. Інформаційна система екологічного моніторингу Шацького національного природного парку // Системи контролю навколишнього середовища. Засоби і моніторинг. – Львів, 2012.
26. Васенко О. Г. Сучасний стан системи моніторингу довкілля в Україні // Екологічна безпека та природокористування. – 2023. – № 6. – С. 90–99.
27. Проєктування інформаційних систем : навч. посіб. – Запоріжжя : ЗНУ, 2022. – 148 с.
28. Гриша С. М. Основи проєктування баз даних : навч. посіб. – К. : КНУБА, 2005. – 184 с.
29. Харів Н. О. Бази даних та інформаційні системи : навч. посіб. – Рівне : НУВГП, 2018. – 127 с.
30. Смірнов С. А., Сидоренко В. В., Константинова Л. В. Організація баз даних : навч. посіб. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 274 с.
31. Лавріщева К. М. Програмна інженерія : підруч. – К. : Либідь, 2008. – 319 с.
32. Корнієнко Б. Я. Компоненти програмної інженерії. Архітектура програмного забезпечення : навч. посіб. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 120 с.

33. Python 3. Документація офіційного сайту Python Software Foundation [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://docs.python.org/3/>
34. The Python Tutorial. Офіційний підручник з мови Python [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://docs.python.org/3/tutorial/>
35. Єсіна О. Г. Оцінка економічної ефективності впровадження інформаційних технологій // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2013. – № 42. – С. 175–180.
36. Єрмоленко А. А. Оцінка економічної ефективності інформаційних систем // Економіка та суспільство. – 2019. – № 21.
37. Терехов Д. С. Оцінка ефективності використання інформаційних систем управління // Вісник ХНУ. – 2010. – № 6, ч. 3. – С. 223–227.
38. Методи оцінки ефективності впровадження інформаційних систем // Економіка та держава. – 2016. – № 4.
39. Зарплати українських розробників — літо 2024 / Режим доступу: <https://dou.ua/lenta/articles/salary-report-devs-summer-2024/>
40. Середня зарплата за категорією «ІТ, комп'ютери, інтернет» в Україні / Режим доступу: <https://www.work.ua/salary-it/>

Додаток А

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Аналіз критеріїв екологічної безпеки промислових підприємств

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ екології, хімії та технологій захисту довкілля

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 0,6 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

зав. каф. ЕХТЗД Іщенко В.А.

(прізвище, ініціали, посада)

доц. каф. ЕХТЗД Васильківський І.В.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Матусяк М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

Сакалова Г. В.

Здобувач

Цимбалюк О. П.

Додаток Б

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ



Рисунок Б.1 – Алгоритмічна блок-схема роботи системи

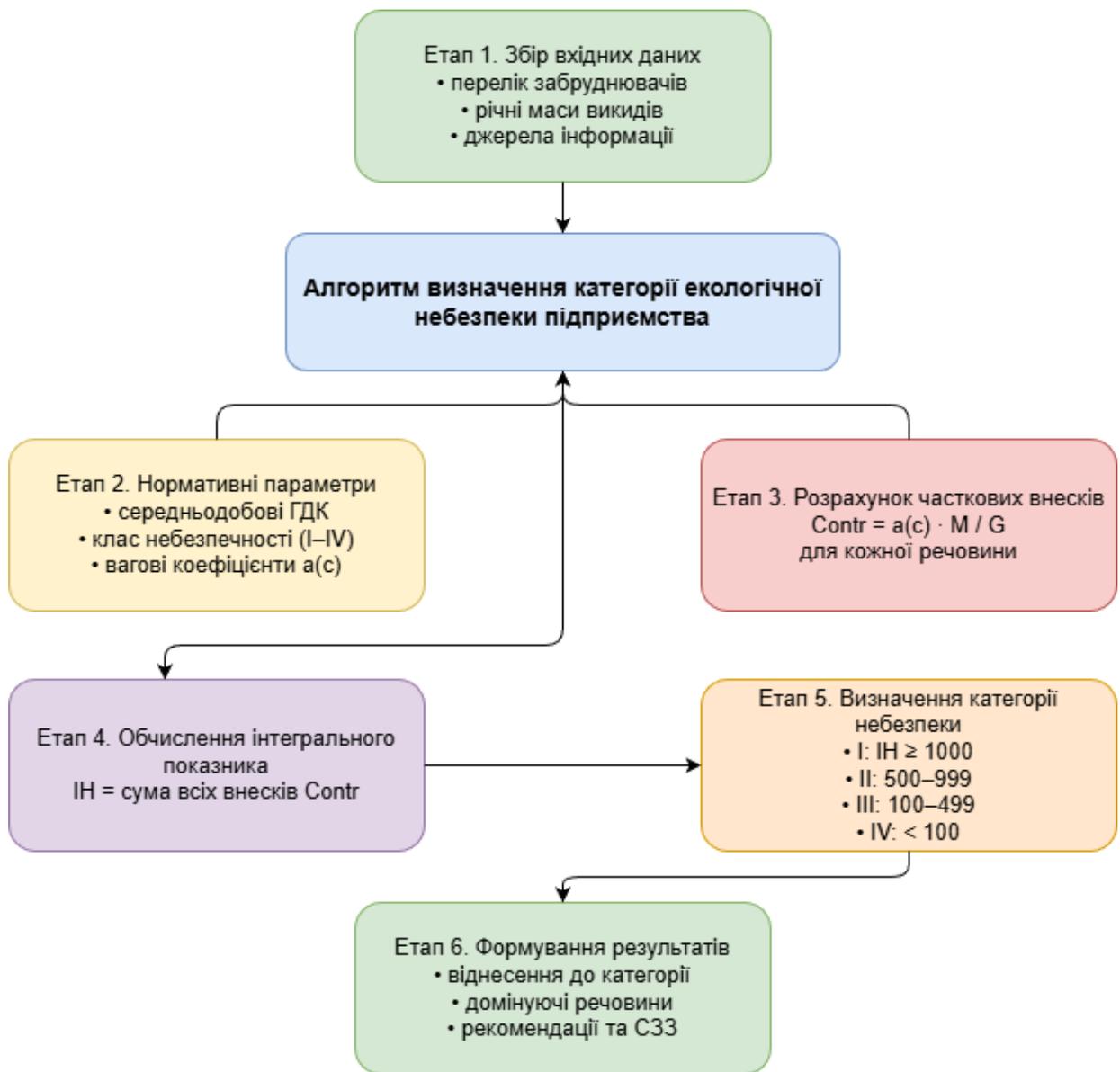


Рисунок Б.2 – Узагальнена схема алгоритму визначення категорії екологічної небезпеки підприємства

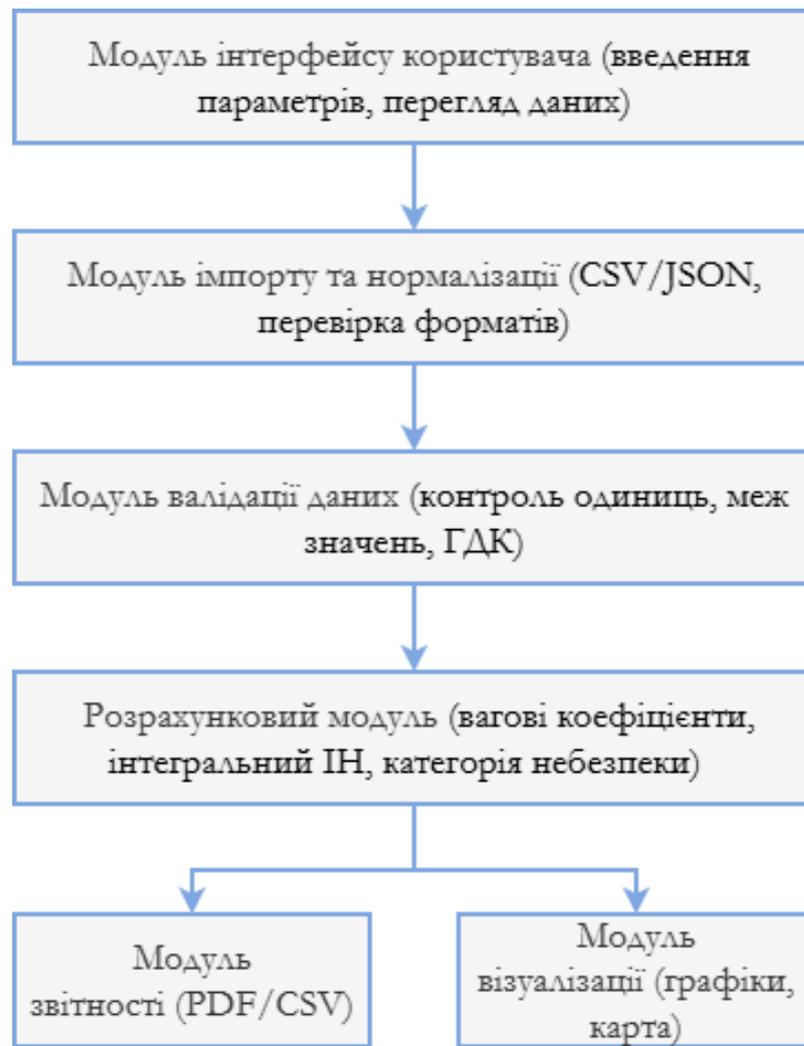


Рисунок Б.3 - Структурна схема архітектури інформаційної системи

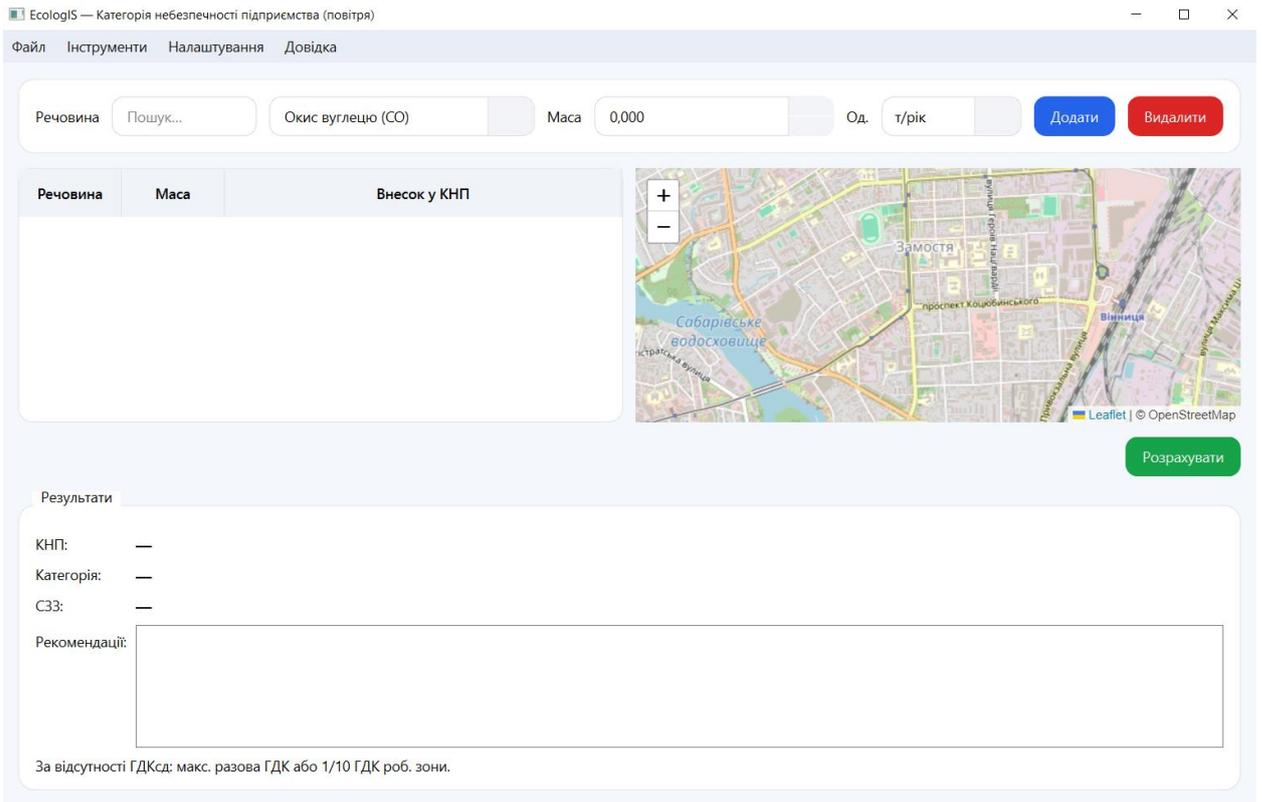


Рисунок Б.4 – Загальний вигляд інтерфейсу системи

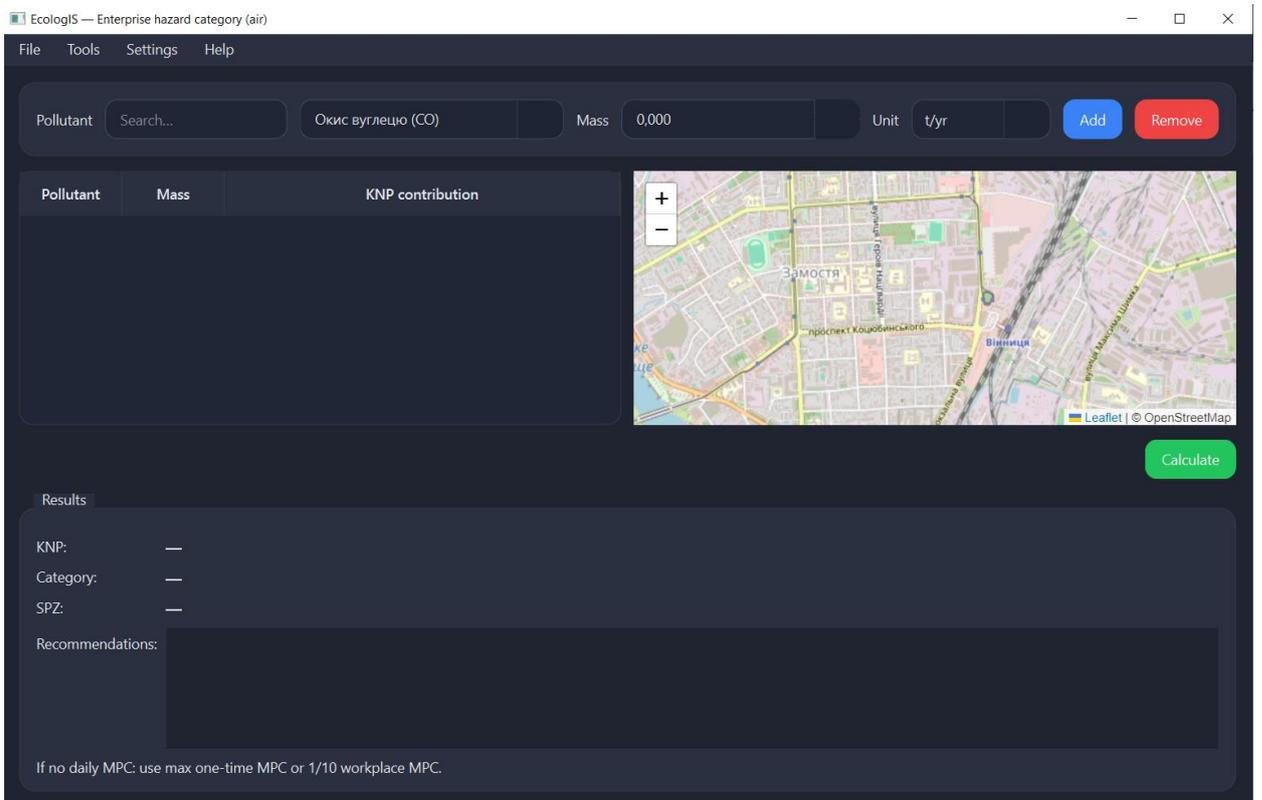


Рисунок Б.5 – Відображення інтерфейсу у темній темі
з англійською локалізацією



Рисунок Б.6 – Сертифікат за участь в міжнародній науково-технічній конференції