

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Географічний факультет
Кафедра геодезії та картографії

На правах рукопису
УДК [528.94:504 + 004.9] (477.51)

КАРТОГРАФІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ (НА ПРИКЛАДІ ДНІПРОПЕТРОВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Галузь знань 10 – “Природничі науки”
Спеціальність 103 – “Науки про Землю”
Освітня програма – “Картографія, географічні інформаційні системи,
дистанційне зондування Землі”

Кваліфікаційна робота
бакалавра студента 4 курсу
Огороднічука Максима Сергійовича

Науковий керівник –
професор кафедри геодезії та картографії,
доктор географічних наук, професор
Бондаренко Едуард Леонідович

Допущено до захисту:
Протокол засідання кафедри № 12 від 27 травня 2025 року
Завідувач кафедри проф. Людмила ДАЦЕНКО

РЕФЕРАТ

Огороднічук М. С. Картографічне забезпечення моніторингу забруднення атмосферного повітря на прикладі Дніпропетровської області. – Кваліфікаційна робота бакалавра. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, географічний факультет, кафедра геодезії та картографії. – Київ, 2025.

Об'єкт дослідження: процеси картографічного забезпечення моніторингу забруднення атмосферного повітря.

Предмет дослідження: методи картографування та просторового аналізу екологічних даних для оцінки рівня забруднення повітря в Дніпропетровській області.

Мета роботи: розробка методики картографічного забезпечення моніторингу забруднення атмосферного повітря на прикладі Дніпропетровської області та створення відповідних картографічних моделей для оцінки рівня забруднення та простеження динаміки його змін.

Методи дослідження: картографічний аналіз, просторове моделювання, геоінформаційні технології, дистанційне зондування Землі, статистичний аналіз, математичне моделювання.

Результати дослідження:

Проведено комплексний аналіз теоретичних основ картографічного забезпечення екологічного моніторингу та визначено його роль у вивченні стану довкілля. Досліджено сучасні методи просторового аналізу екологічних даних та можливості їх застосування для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря.

Здійснено детальний аналіз основних джерел забруднення атмосферного повітря в Дніпропетровській області, включаючи промислові підприємства металургійної, хімічної, машинобудівної та енергетичної галузей, а також автомобільний транспорт. Особливу увагу приділено аналізу викидів зважених часток PM_{2.5} і PM₁₀, оксидів азоту, діоксиду сірки, вуглекислого газу та

важких металів.

Розроблено комплексну методику побудови картографічних моделей розподілу забруднювачів з використанням сучасних геоінформаційних технологій та даних дистанційного зондування Землі. Методика передбачає інтеграцію різних типів екологічних даних, їх просторову інтерполяцію та візуалізацію у вигляді тематичних карт.

Виконано всебічний аналіз сучасного стану забруднення атмосферного повітря в Дніпропетровській області за допомогою картографічних методів. Визначено просторовий розподіл концентрацій основних забруднюючих речовин, виявлено зони підвищеного ризику та встановлено ключові тенденції змін якості повітря.

Створено серію авторських тематичних карт забруднення атмосфери, що відображають територіальний розподіл концентрацій різних забруднювачів. Розроблено інтерактивні картографічні моделі, що дозволяють здійснювати аналіз динаміки забруднення в режимі реального часу.

Проведено оцінку ефективності використання картографічного аналізу в системах екологічного моніторингу та управління якістю атмосферного повітря. Визначено переваги застосування ГІС-технологій для автоматизації процесів збору, обробки та аналізу екологічних даних.

Наукова новизна: полягає у комплексному застосуванні геоінформаційних систем та дистанційного зондування Землі для створення інтерактивних карт забруднення атмосферного повітря та аналізу їх динаміки. Запропоновано новий підхід до побудови картографічних моделей, що дозволяє здійснювати комплексну оцінку просторово-часових змін забруднення та прогнозувати його розвиток у майбутньому.

Практична значущість: результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення системи моніторингу якості повітря, розробки екологічних програм, підготовки рекомендацій для природоохоронних організацій та органів місцевого самоврядування. Створені картографічні моделі сприятимуть підвищенню ефективності управління якістю атмосферного повітря та розробці

науково обґрунтованих заходів з покращення екологічної ситуації в регіоні.

Структура роботи: дипломна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 66 сторінок, включаючи ілюстративний матеріал та додатки.

Робота виконана на кафедрі геодезії та картографії географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка під керівництвом доктора географічних наук, професора Бондаренка Едуарда Леонідовича.

Ключові слова: картографічне забезпечення, моніторинг довкілля, забруднення атмосферного повітря, геоінформаційні системи, дистанційне зондування, Дніпропетровська область, екологічний моніторинг, просторовий аналіз.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КАРТОГРАФІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ	10
1.1. Поняття та значення картографічного забезпечення в екологічному моніторингу	10
1.2. Основні методи просторового аналізу екологічних даних	12
1.3. Геоінформаційні системи та дистанційне зондування у моніторингу довкілля.....	15
1.4. Методи картографування забруднення атмосфери	17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА КАРТОГРАФІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....	21
2.1. Основні джерела забруднення атмосфери у Дніпропетровській області	21
2.2. Підходи до оцінки рівня забруднення повітря	23
2.3. Методика побудови картографічних моделей забруднення атмосфери	25
2.4. Використання авторських карт у моніторингу довкілля.....	29
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В ДНІПРОПЕТРОВСЬКІЙ ОБЛАСТІ.....	31
3.1. Загальна екологічна ситуація в регіоні	31
3.2. Оцінка рівня забруднення атмосфери за показниками якості повітря	34
3.3. Просторовий аналіз атмосферного забруднення за допомогою картографічних методів.....	39
РОЗДІЛ 4. ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ ТА КАРТОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ	43
4.1. Впровадження ГІС-технологій у дослідження забруднення повітря	43
4.2. Розробка тематичних карт забруднення атмосфери.....	46
4.3. Використання картографічного аналізу для прогнозування змін у якості повітря.....	49
4.4. Оцінка ефективності використання картографічних моделей у	

	6
екологічному моніторингу.....	52
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ КАРТОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ В МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ	54
5.1. Розробка авторських карт для моніторингу забруднення атмосфери ..	54
5.2. Використання картографічних моделей у природоохоронній діяльності	56
5.3. Оцінка ефективності картографічного підходу в управлінні якістю повітря	58
5.4. Перспективи розвитку картографічних методів у сфері екологічного моніторингу	61
ВИСНОВКИ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
ДОДАТКИ.....	70

ВСТУП

Забруднення атмосферного повітря є однією з найгостріших екологічних проблем сучасного світу, що суттєво впливає на стан довкілля, здоров'я людей та загальну якість життя. Особливо це питання є актуальним для промислово розвинених регіонів, де зосереджено значну кількість джерел викидів забруднюючих речовин у повітря. Інтенсивний розвиток металургійної, хімічної, машинобудівної та енергетичної промисловості, збільшення транспортного навантаження та недостатня ефективність природоохоронних заходів призводять до постійного погіршення стану атмосферного середовища.

Дніпропетровська область, як один із найбільш індустріально розвинених регіонів України, має складну екологічну ситуацію, пов'язану з високим рівнем забруднення повітря. Викиди промислових підприємств, автомобільного транспорту та інших джерел значною мірою впливають на якість атмосферного повітря та зумовлюють виникнення серйозних екологічних і соціальних наслідків. Особливу небезпеку становлять зважені частинки PM_{2.5} і PM₁₀, оксиди азоту, діоксид сірки, вуглекислий газ та важкі метали, які мають здатність накопичуватися в навколишньому середовищі, впливати на кліматичні умови, спричиняти захворювання дихальної та серцево-судинної системи.

Одним із найбільш ефективних методів оцінки рівня забруднення повітря та аналізу його просторово-часових змін є використання картографічного аналізу. Картографічне забезпечення моніторингу довкілля дозволяє створювати детальні просторові моделі, що наочно відображають територіальний розподіл концентрацій забруднюючих речовин, визначати джерела їх надходження, а також прогнозувати можливі зміни екологічної ситуації. Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) та технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) забезпечують ефективну обробку великої кількості екологічних даних, дозволяють автоматизувати процеси збору, аналізу та візуалізації інформації, що сприяє підвищенню точності оцінки стану

атмосферного повітря.

Особливої актуальності дослідження набуває в умовах зростаючого впливу антропогенних факторів на природне середовище та необхідності впровадження ефективних механізмів управління якістю повітря. Використання картографічних методів у поєднанні з математичним моделюванням та статистичним аналізом дозволяє здійснювати оцінку рівня забруднення повітря в режимі реального часу, визначати найбільш уразливі території, розробляти науково обґрунтовані заходи з покращення екологічної ситуації.

З огляду на це, метою дипломної роботи є розробка методики картографічного забезпечення моніторингу забруднення атмосферного повітря на прикладі Дніпропетровської області та створення відповідних картографічних моделей, що дозволять оцінити рівень забруднення та простежити динаміку його змін.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

Проаналізувати теоретичні основи картографічного забезпечення екологічного моніторингу, його роль та значення у вивченні стану довкілля.

Дослідити сучасні методи просторового аналізу екологічних даних та можливості їх застосування для оцінки рівня забруднення повітря.

Визначити основні джерела забруднення атмосферного повітря в Дніпропетровській області та оцінити їх вплив на загальну екологічну ситуацію.

Розробити методику побудови картографічних моделей розподілу забруднювачів з використанням геоінформаційних технологій та дистанційного зондування.

Виконати аналіз сучасного стану забруднення повітря в регіоні за допомогою картографічних методів та визначити ключові тенденції його змін.

Оцінити ефективність використання картографічного аналізу в моніторингу довкілля та можливості його застосування у системах управління якістю атмосферного повітря.

Об'єктом дослідження є процеси картографічного забезпечення

моніторингу забруднення атмосферного повітря, а предметом – методи картографування та просторового аналізу екологічних даних для оцінки рівня забруднення повітря в Дніпропетровській області.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному застосуванні геоінформаційних систем та дистанційного зондування Землі для створення інтерактивних карт забруднення атмосферного повітря та аналізу їх динаміки. У роботі запропоновано новий підхід до побудови картографічних моделей, що дозволяє здійснювати комплексну оцінку просторово-часових змін забруднення та прогнозувати його розвиток у майбутньому.

Практична цінність дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення системи моніторингу якості повітря, розробки екологічних програм, підготовки рекомендацій для природоохоронних організацій та органів місцевого самоврядування.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КАРТОГРАФІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ

1.1. Поняття та значення картографічного забезпечення в екологічному моніторингу

Сучасний стан довкілля, зокрема у великих урбанізованих регіонах, характеризується інтенсивним техногенним навантаженням, що призводить до значного погіршення якості навколишнього середовища. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває необхідність оперативного та достовірного моніторингу екологічної ситуації. Один із ключових інструментів, який забезпечує ефективну візуалізацію, інтерпретацію та аналіз екологічних даних, – це картографічне забезпечення.

Картографічне забезпечення екологічного моніторингу — це система науково обґрунтованих методів, технічних засобів і технологій, що дає змогу здійснювати збір, обробку, аналіз та візуалізацію просторової інформації про стан довкілля. Воно є невід'ємною складовою частиною системи екологічного моніторингу, оскільки дозволяє представити результати спостережень у формі картографічних моделей, що значно полегшує їх розуміння, порівняння та прогнозування змін екологічних умов.

Картографічне забезпечення охоплює широкий спектр завдань — від збору первинних геопросторових даних до побудови інтерактивних аналітичних карт. Зокрема, для моніторингу стану атмосферного повітря використовуються:

- карти просторового розподілу концентрацій шкідливих речовин;
- карти джерел забруднення (стаціонарних і мобільних);
- карти рівнів екологічної небезпеки;
- карти сценарного прогнозування (моделювання розповсюдження забруднення в часі).

Значення картографічного забезпечення полягає у його здатності:

- перетворювати великі обсяги числової інформації у наочну форму;
- виявляти приховані просторові залежності та закономірності;

- забезпечувати порівняльний аналіз між різними регіонами або часовими періодами;
- бути основою для прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля.

Використання геоінформаційних систем (ГІС) значно розширило можливості картографічного забезпечення. Завдяки ГІС, стало можливим інтегрувати різноманітні екологічні дані, проводити багаторівневий аналіз, створювати тривимірні моделі, здійснювати просторову кореляцію між природними та техногенними факторами. ГІС також дозволяють формувати динамічні карти, що оновлюються в реальному часі, що є надзвичайно важливим для реагування на надзвичайні ситуації або для моніторингу швидких змін у стані атмосфери [1].

Іншим важливим компонентом картографічного забезпечення є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), яке забезпечує регулярне отримання оперативних даних про стан атмосфери, рослинності, гідрологічного режиму тощо. Дані супутникових знімків є основою для побудови великомасштабних тематичних карт, а також для проведення ретроспективного аналізу змін, що відбулися у довкіллі. Окрему роль відіграє використання математичних і статистичних моделей, які інтегруються у картографічні продукти для прогнозування поширення забруднюючих речовин залежно від погодних умов, рельєфу місцевості, щільності забудови тощо.

Таблиця 1.1

Основні компоненти картографічного забезпечення екологічного моніторингу

Компонент	Опис
Геоінформаційні системи (ГІС)	Використовуються для зберігання, аналізу та візуалізації просторових даних
Картографічні моделі	Включають тематичні карти забруднення та екологічних ризиків
Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ)	Забезпечує отримання актуальних даних про стан довкілля
Бази екологічних даних	Містять інформацію про рівень забруднення та екологічні параметри

Як показано в таблиці 1.1, картографічне забезпечення є комплексною системою взаємопов'язаних компонентів. Важливим аспектом є створення інтерактивних картографічних моделей, які дозволяють користувачам у режимі реального часу отримувати доступ до оновлених екологічних даних та відстежувати зміни рівня забруднення [2].

Таким чином, картографічне забезпечення виконує не лише допоміжну функцію у системі екологічного моніторингу, а й виступає ключовим засобом оцінки, аналізу та прийняття рішень у сфері управління природоохоронною діяльністю. Застосування сучасних цифрових картографічних технологій значно підвищує якість моніторингу та сприяє формуванню ефективної екологічної політики на регіональному та національному рівнях.

1.2. Основні методи просторового аналізу екологічних даних

Просторовий аналіз екологічних даних є невід'ємною складовою картографічного забезпечення моніторингу довкілля. Він дозволяє здійснювати системну оцінку впливу різноманітних чинників на стан навколишнього середовища, виявляти просторові закономірності та аномалії, прогнозувати зміни, а також визначати екологічно вразливі зони. На відміну від традиційних статистичних підходів, методи просторового аналізу враховують не лише значення параметрів, а й їх розміщення у просторі, що особливо важливо в екології, де багато процесів мають чітко виражену географічну прив'язку.

Серед основних завдань просторового аналізу — оцінка рівнів забруднення, виявлення джерел та шляхів поширення шкідливих речовин, моделювання ризиків, візуалізація екологічних загроз, а також аналіз ефективності природоохоронних заходів у різних регіонах. Екологічні дані часто є неповними або нерівномірно розподіленими, тому виникає необхідність у застосуванні спеціалізованих методів для їх інтерпретації та узагальнення.

Інтерполяційні методи.

Інтерполяція є базовим інструментом просторового аналізу, що дозволяє

оцінити значення екологічних показників у точках, де відсутні прямі спостереження. Вона особливо корисна в моніторингу атмосферного повітря, коли необхідно створити безперервну карту розподілу концентрації шкідливих речовин на основі обмеженої кількості вимірювань.

- IDW (інтерполяція зваженого середнього за оберненими відстанями) – один з найпростіших методів, який використовує правило: чим ближче точка спостереження, тим більший її вплив на прогнозоване значення. Його перевагою є легкість реалізації та висока швидкість обчислень.
- Кригінг — потужніший геостатистичний метод, що базується на варіограмному аналізі просторової кореляції між даними. Його використання дозволяє не тільки прогнозувати значення, але й оцінити похибку кожного прогнозу, що є надзвичайно важливим при прийнятті управлінських рішень.
- Сплайн-інтерполяція застосовується для побудови гладких поверхонь і дозволяє зберігати плавність переходів між значеннями, що важливо для відображення природних процесів.
- Методи кластерного аналізу

Кластеризація застосовується для ідентифікації груп об'єктів або територій із подібними екологічними характеристиками. Наприклад, вона дозволяє виділити зони підвищеної концентрації забруднювачів, що полегшує визначення пріоритетних напрямів природоохоронної політики.

Методи кластерного аналізу включають:

- ієрархічну кластеризацію;
- метод k-середніх (k-means);
- самоорганізувальні карти Кохонена, які особливо ефективні у візуалізації багатовимірних екологічних даних.

Аналіз часових рядів

Просторовий аналіз часто доповнюється аналізом темпоральних змін, що дає змогу оцінити динаміку змін параметрів довкілля. Методи аналізу часових рядів дозволяють визначити тренди, сезонні коливання, цикли, а також виявити

аномальні події (наприклад, різке зростання концентрації шкідливих речовин через аварії або метеорологічні умови).

Моделювання потоків та дисперсії.

Для оцінки механізмів поширення забруднення використовуються моделі потоків повітряних мас і водних об'єктів. Ці моделі поєднують просторові дані з метеорологічною та гідрологічною інформацією, дозволяючи моделювати розповсюдження домішок у повітрі чи воді залежно від напрямку вітру, температури, рельєфу місцевості тощо.

Геостатистичні методи.

До геостатистичних підходів, окрім кригінгу, належать анізотропний аналіз, побудова ізоліній (контурних ліній однакових значень), моранічний аналіз тощо. Ці методи дозволяють:

- враховувати просторову залежність між об'єктами;
- проводити статистичну оцінку точності;
- створювати високоточні картографічні моделі з урахуванням невизначеностей.

Таблиця 1.2

Методи просторового аналізу екологічних даних

Метод	Призначення	Переваги
Інтерполяція	Прогнозування екологічних показників у місцях без вимірювань	Створення безперервних карт
Кластеризація	Визначення зон з підвищеним рівнем забруднення	Групування подібних територій
Аналіз часових рядів	Оцінка змін екологічних параметрів у часі	Виявлення тенденцій
Моделювання потоків	Аналіз руху повітряних мас та поширення забруднень	Прогнозування забруднення

Просторово-часовий аналіз.

Цей підхід поєднує просторові та часові параметри в одному середовищі, дозволяючи побудову 4D-моделей (3 просторових координати + час). Такий аналіз дає змогу:

- фіксувати швидкість поширення забруднювачів;
- оцінювати зміну інтенсивності джерел забруднення з плином часу;
- формувати прогностичні моделі динаміки екологічного стану територій.

Геостатистичні методи становлять окрему групу методів просторового аналізу, спеціально розроблених для роботи з просторово корельованими даними. Як видно з таблиці 1.2, ці методи дозволяють отримувати не лише оцінки досліджуваних параметрів, але й характеристики надійності цих оцінок.

Просторово-часовий аналіз поєднує просторові та часові аспекти дослідження екологічних процесів. Він дозволяє відстежувати еволюцію просторових структур забруднення у часі та виявляти зони з аномальною динамікою. Такий аналіз є особливо важливим для прогнозування розвитку екологічної ситуації [3].

1.3. Геоінформаційні системи та дистанційне зондування у моніторингу довкілля

Геоінформаційні системи (ГІС) та дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) становлять основу інноваційного підходу до вивчення екологічного стану довкілля. Ці технології дозволяють здійснювати моніторинг забруднення атмосферного повітря з високою просторовою та часовою роздільністю, створюючи базу для прийняття обґрунтованих рішень у сфері природоохоронної політики та сталого розвитку.

ГІС є потужним інструментом для збору, зберігання, обробки, аналізу та візуалізації просторово-часових екологічних даних. Сучасні ГІС-платформи (наприклад, ArcGIS, QGIS, MapInfo) дають змогу інтегрувати дані з різних джерел: стаціонарних пунктів спостереження, мобільних станцій, супутникових знімків, метеорологічних моделей та аналітичних прогнозів. У контексті екологічного моніторингу особливу увагу приділяють аналізу просторового розподілу концентрацій шкідливих речовин, визначенню джерел забруднення, моделюванню сценаріїв поширення поллютантів.

Типова структура ГІС для екологічного аналізу включає:

- Базу даних, що зберігає геопросторову інформацію (координати, значення параметрів, час спостереження);
- Аналітичний модуль, який забезпечує обробку даних за допомогою просторових інтерполяцій, кластерного аналізу, побудови ізоліній тощо;
- Картографічний модуль, що створює тематичні карти для візуального представлення даних;
- Інтерфейс користувача, що дозволяє здійснювати навігацію, фільтрацію та аналіз інформації.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є невід’ємним елементом сучасних систем екологічного моніторингу. Воно дає можливість отримувати регулярні та масштабні дані про стан атмосфери, рослинності, ґрунтів, водних ресурсів. Супутникові сенсори, такі як Sentinel-5P (TROPOMI), MODIS, Landsat-8 та VIIRS, дозволяють контролювати рівень забруднення повітря, виявляти зони накопичення аерозолів, оцінювати зміни екосистем унаслідок антропогенного впливу[4].

Таблиця 1.3

Основні супутникові системи для моніторингу якості повітря

Супутник/Сенсор	Просторове розрізнення	Часове розрізнення	Основні параметри
Sentinel-5P/TROPOMI	3.5×7 км	Щоденно	NO ₂ , SO ₂ , CO, O ₃ , CH ₄
Terra/MODIS	1 км	Щоденно	Аерозольна оптична товщина
Landsat-8/OLI	30 м	16 днів	Поверхневі характеристики
Suomi-NPP/VIIRS	750 м	Щоденно	Нічні вогні, аерозолі

Принципи роботи супутникових сенсорів базуються на реєстрації електромагнітного випромінювання у різних спектральних діапазонах. Різні забруднюючі речовини мають характерні спектральні сигнатури, що дозволяє їх ідентифікувати та кількісно оцінювати за супутниковими даними, як

показано в табл.1.3 [5].

Завдяки різним спектральним діапазорам та високій точності вимірювань, супутники забезпечують оперативний контроль динаміки забруднення, що особливо актуально під час виникнення надзвичайних ситуацій, таких як пожежі, промислові аварії чи пилові бурі.

Принцип роботи ДЗЗ базується на аналізі електромагнітного випромінювання, яке відбивається або випромінюється об'єктами поверхні Землі. Кожна речовина має характерну спектральну сигнатуру, що дозволяє ідентифікувати та кількісно визначати її концентрацію за супутниковими знімками.

Інтеграція ГІС і ДЗЗ у межах єдиної системи екологічного моніторингу створює синергетичний ефект. З одного боку, супутникові дані забезпечують широке покриття та часте оновлення, з іншого – ГІС забезпечує детальний аналіз, моделювання процесів та розробку сценаріїв змін. Наприклад, за допомогою моделей розсіювання забруднень у повітрі, інтегрованих у ГІС, можна прогнозувати концентрацію шкідливих речовин у різних районах міста залежно від погодних умов та інтенсивності джерел викидів.

Таким чином, поєднання ГІС та ДЗЗ є ефективним інструментом для побудови комплексних систем моніторингу довкілля, прийняття екологічно обґрунтованих рішень та формування політики сталого розвитку. У сучасних умовах урбанізації та зростання екологічних ризиків, роль цих технологій лише посилюється. Вони забезпечують не лише фіксацію стану середовища, але й слугують платформою для громадського контролю, наукових досліджень та навчання.

1.4. Методи картографування забруднення атмосфери

Картографування забруднення атмосферного повітря є одним із ключових інструментів у системі екологічного моніторингу та управління якістю довкілля. Воно дозволяє візуалізувати просторові відмінності в концентраціях

забруднюючих речовин, оцінювати масштаби впливу антропогенних джерел, визначати зони ризику для здоров'я населення та обґрунтовувати заходи для поліпшення екологічної ситуації.

Цей процес поєднує як традиційні геоінформаційні методи, так і сучасні цифрові підходи, що базуються на даних дистанційного зондування, математичного моделювання та штучного інтелекту.

Традиційні методи картографування.

Одним з найстаріших та широко застосовуваних є ізолінійне картографування, при якому на основі значень забруднення в окремих пунктах будується система ізоліній — ліній, що з'єднують точки з однаковою концентрацією певної речовини (наприклад, NO₂ або PM₁₀). Для створення таких карт зазвичай використовують методи просторової інтерполяції — інверсне зважене середнє (IDW), Крігінг або сплайн-інтерполяцію. Цей підхід є ефективним, якщо мережа наземних вимірювань є достатньо щільною та рівномірною.

Ще одним традиційним методом є точкове картографування, де дані вимірювань відображаються у вигляді символів (колір, розмір), що відповідають рівню забруднення у конкретному місці. Такі карти зручні для швидкої оцінки стану повітря у ключових точках (наприклад, у місцях з інтенсивним транспортом або поруч із промисловими об'єктами).

Картографування зонування базується на розподілі території на зони з однаковими рівнями забруднення. Для цього застосовуються класифікаційні алгоритми, такі як методи природних перерв (natural breaks), квантилів або рівновеликих інтервалів.

Модельні методи.

Картографування на основі математичних моделей поширення забруднюючих речовин в атмосфері є важливим у випадках, коли наземні вимірювання обмежені або потрібен прогноз. Такі моделі враховують:

- швидкість та напрям вітру;
- інтенсивність і тип викидів;

- рельєф місцевості;
- температуру, вологість та інші метеорологічні параметри.

Популярними є моделі HYSPLIT, CALPUFF, AERMOD, які дають змогу розрахувати концентрації забруднювачів на певній території у визначений момент часу або за період. Результати таких розрахунків інтегруються у ГІС та візуалізуються у вигляді карт.

Супутникове картографування

Останніми роками особливого розвитку набули методи супутникового картографування. Завдяки сенсорам, встановленим на супутниках Sentinel-5P, Terra, Aqua, Landsat та ін., можливо регулярно отримувати просторові дані про вміст забруднюючих речовин у атмосфері. Ці дані особливо корисні для регіонального або глобального моніторингу, коли доступ до наземних станцій обмежений [6].

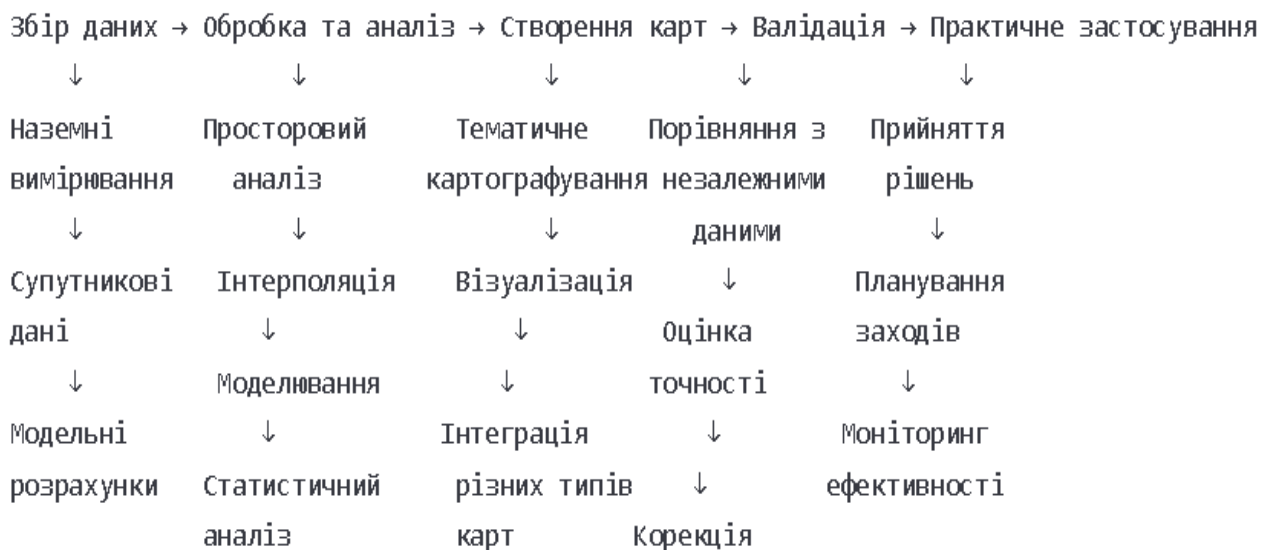


Рис. 1.1. Схема процесу картографування забруднення атмосфери.

Супутникові дані проходять попередню обробку – корекцію атмосферних впливів, геоприв'язку, фільтрацію хмарності, після чого вони можуть бути інтегровані у ГІС для створення тематичних карт.

Інтегровані методи.

Найсучаснішим підходом є інтегроване картографування, що поєднує дані з декількох джерел: супутникові вимірювання, наземні спостереження та

модельні розрахунки. Один із прикладів – система CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), яка використовує технологію асиміляції даних, коли вимірювання коригують модельні прогнози, підвищуючи їх точність.

Як показано на рисунку 1.1, процес картографування забруднення атмосфери включає послідовність взаємопов'язаних етапів від збору первинних даних до практичного застосування результатів.

Інтегровані методи картографування поєднують переваги різних підходів, використовуючи одночасно наземні вимірювання, супутникові дані та модельні розрахунки. Такі методи включають асиміляцію даних у модельні розрахунки та статистичне об'єднання різних джерел інформації.

Для картографічного відображення рівнів забруднення атмосферного повітря найкраще використовувати типову шкалу з градацією від зеленого (низький рівень забруднення) до червоного (високий рівень забруднення) кольорів. Така колірна схема є інтуїтивно зрозумілою для широкого кола користувачів [7].

Валідація карт забруднення є обов'язковою складовою процесу картографування. Вона включає порівняння картографічних продуктів з незалежними вимірюваннями та оцінку невизначеності результатів. Особливу увагу приділяють валідації супутникових продуктів, оскільки вони можуть мати систематичні похибки.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА КАРТОГРАФІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

2.1. Основні джерела забруднення атмосфери у Дніпропетровській області

Дніпропетровська область є одним із найбільш промислово розвинених регіонів України з високим рівнем техногенного навантаження на довкілля. Область займає перше місце в Україні за обсягами промислового виробництва та викидів шкідливих речовин в атмосферу. Основними джерелами забруднення атмосферного повітря є металургійні підприємства, теплоелектростанції, хімічні виробництва та транспортна інфраструктура.



**Рис. 2.1. Основні джерела забруднення атмосферного повітря
Дніпропетровській області.**

Металургійний комплекс

Металургійний сектор відіграє ключову роль у структурі промислового забруднення області, формуючи понад 45% усіх викидів. Великі підприємства,

такі як "АрселорМіттал Кривий Ріг", "Дніпровський металургійний завод" та "Кам'янський металургійний завод", викидають в атмосферу широкий спектр забруднюючих речовин.

Процеси виплавки металу супроводжуються викидами оксиду вуглецю (CO) до 45 тис. тонн на рік, діоксиду сірки (SO₂) до 35 тис. тонн, а також значних кількостей твердих частинок та важких металів. Коксохімічне виробництво додатково виділяє канцерогенні сполуки, зокрема бенз(а)пірен, що становить особливу небезпеку для здоров'я населення прилеглих територій.

Енергетичний сектор

Теплоелектростанції області, включаючи Придніпровську ТЕС, Криворізьку ТЕС та низку менших енергетичних об'єктів, є другим за значимістю джерелом забруднення атмосфери. Спалювання вугілля та природного газу для виробництва електроенергії призводить до викидів діоксиду сірки (до 25 тис. тонн на рік), оксидів азоту (до 18 тис. тонн) та летючої золи.

Особливо проблематичним є використання низькоякісного вугілля з високим вмістом сірки, що значно підвищує рівень SO₂ в атмосфері. Це спричиняє формування кислотних дощів, які негативно впливають на лісові екосистеми та сільськогосподарські угіддя регіону.

Хімічна промисловість

Хімічний комплекс області представлений підприємствами з виробництва мінеральних добрив, пластмас, лакофарбових матеріалів та іншої хімічної продукції. ПАТ "Дніпроазот", "Дніпрохім" та інші хімічні заводи виділяють у повітря аміак (NH₃), хлор (Cl₂), сірководень (H₂S) та леткі органічні сполуки (ЛОС).

Викиди аміаку становлять особливу проблему, оскільки ця речовина не лише токсична для людини, але й сприяє евтрофікації водних екосистем. Загальний обсяг викидів від хімічної промисловості складає близько 10% від загального забруднення атмосфери області.

Транспортна інфраструктура

Транспортний сектор є важливим джерелом забруднення, особливо у великих містах області. Висока щільність автомобільного руху в Дніпрі (понад 400 тис. автомобілів), Кривому Розі (близько 180 тис.) та Кам'янському (понад 80 тис.) створює значне навантаження на атмосферне повітря.

Автотранспорт викидає оксиди азоту (NO_x), чадний газ (CO), леткі органічні сполуки та тверді частинки. Проблему посилює значна частка застарілого автопарку з низькими екологічними стандартами. Додатково, розвинена залізнична мережа та річковий транспорт також вносять свій внесок у забруднення повітря.

Неорганізовані джерела

Спалювання відходів та інші неорганізовані джерела становлять серйозну проблему. Нелегальне спалювання побутових та промислових відходів призводить до викиду надзвичайно токсичних речовин - діоксинів, фуранів та важких металів (свинець, кадмій, ртуть). Ці речовини здатні накопичуватися в організмі людини і викликати онкологічні, нервові та репродуктивні захворювання.

Окремою проблемою є пилоутворення від териконів, шламонакопичувачів та відвалів промислових підприємств, які за несприятливих метеоумов створюють пилові бурі, що поширюються на значні відстані [8].

2.2. Підходи до оцінки рівня забруднення повітря

Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря є важливим етапом екологічного моніторингу, що дозволяє визначати рівень техногенного навантаження на довкілля, прогнозувати екологічні ризики та розробляти ефективні заходи з покращення якості повітря. Існує кілька основних підходів до оцінки забруднення: лабораторні методи аналізу, дистанційне зондування, геоінформаційне моделювання та біоіндикаторні дослідження.

Одним із найбільш поширених методів є лабораторний аналіз

атмосферного повітря. Вимірювання концентрацій забруднюючих речовин здійснюється за допомогою стаціонарних та мобільних станцій моніторингу, що відбирають проби повітря та аналізують їх за вмістом діоксиду сірки, оксидів азоту, чадного газу, твердих частинок та інших шкідливих речовин. Лабораторні дослідження дозволяють отримати високу точність даних, однак вони є досить дорогими та потребують значних часових затрат.

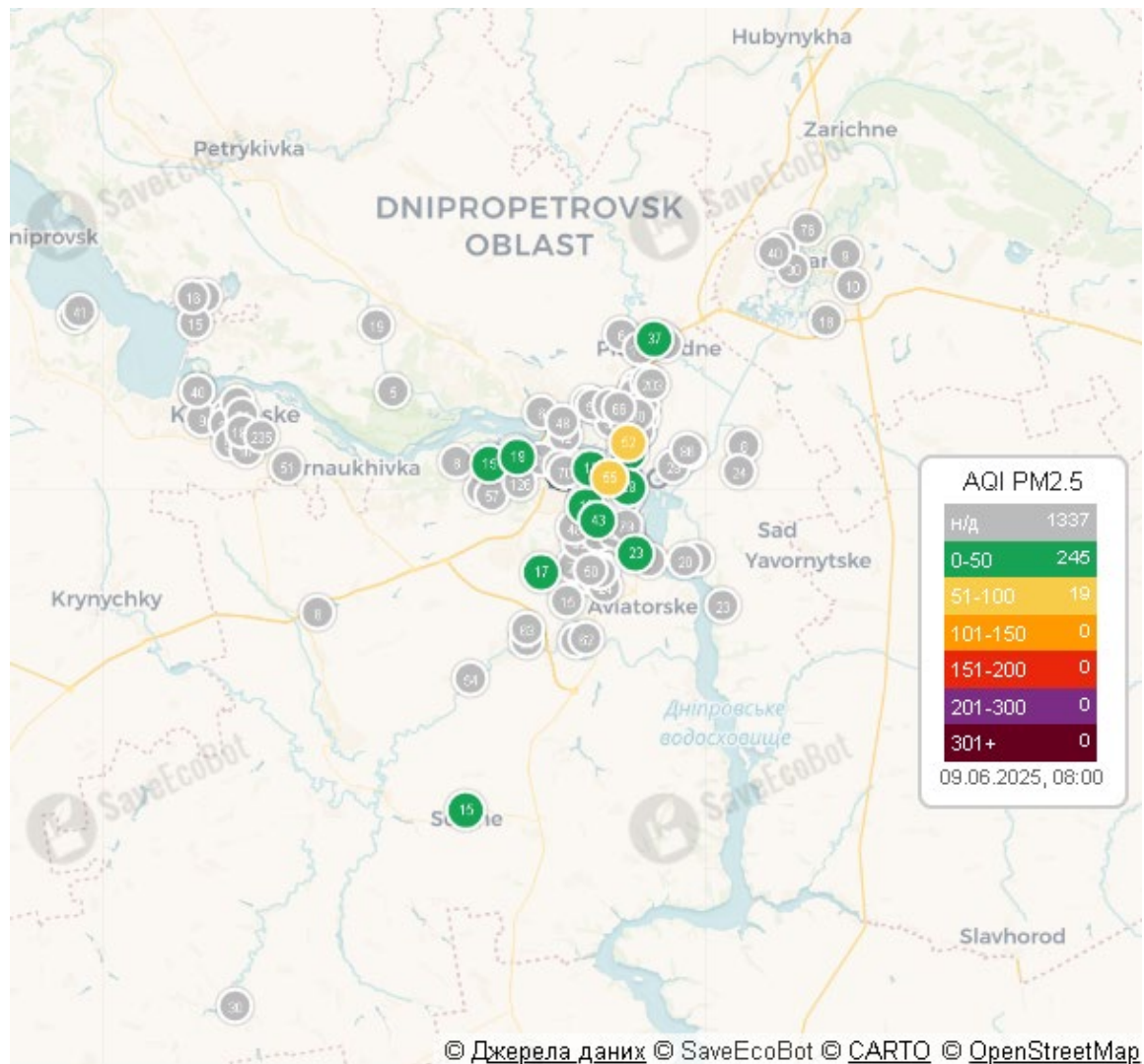


Рис. 2.2. Карта забруднення повітря для Дніпропетровської області.

Дистанційне зондування (ДЗЗ) є ефективним підходом до оцінки забруднення повітря на великих територіях. Супутникові сенсори, такі як TROPOMI на платформі Sentinel-5P, MODIS та OMI, дозволяють здійснювати вимірювання концентрацій забруднюючих речовин у атмосфері в реальному

часі. Цей метод є особливо корисним для моніторингу глобальних та регіональних змін якості повітря, однак він має певні обмеження у роздільній здатності та чутливості до погодних умов.

Геоінформаційне моделювання є сучасним підходом до аналізу забруднення атмосфери. Використовуючи ГІС-технології, можна створювати просторові моделі поширення забруднюючих речовин, прогнозувати їхній вплив на різні території та оцінювати ефективність природоохоронних заходів. Методи інтерполяції, такі як крігінг або зважене середнє обернених відстаней (IDW), дозволяють отримувати детальні карти забруднення, навіть у випадках, коли кількість вимірюваних точок є обмеженою [9].

Біоіндикаторні дослідження є альтернативним підходом до оцінки забруднення повітря. Рослини, мохи, лишайники та інші організми чутливі до змін складу атмосфери, тому їхній стан може слугувати індикатором рівня забруднення. Наприклад, зменшення чисельності лишайників у міських районах часто свідчить про підвищення рівня діоксиду сірки в повітрі. Цей метод є відносно дешевим і може застосовуватися навіть у віддалених регіонах.

Оцінка забруднення атмосфери також включає аналіз метеорологічних факторів, що впливають на поширення шкідливих речовин. Такі параметри, як швидкість та напрямок вітру, температура повітря, вологість та атмосферний тиск, визначають транспорт забруднювачів у просторі та можуть суттєво змінювати рівень забруднення в різні періоди часу.

Комплексне застосування вищезазначених методів дозволяє отримати найбільш точну та об'єктивну картину стану атмосферного повітря у Дніпропетровській області. Врахування просторово-часових тенденцій забруднення допомагає формувати ефективну екологічну політику, спрямовану на зменшення викидів та покращення якості життя населення [10].

2.3. Методика побудови картографічних моделей забруднення атмосфери

Картографічне моделювання забруднення атмосферного повітря є

багатоетапним процесом, що поєднує традиційні картографічні методи з сучасними геоінформаційними технологіями. Цей підхід дозволяє не лише візуалізувати просторовий розподіл забруднюючих речовин, але й прогнозувати їхню динаміку та оцінювати вплив на різні компоненти довкілля [11].

1. Етап збору та підготовки вхідних даних

Первинні дані моніторингу включають результати вимірювань концентрацій забруднюючих речовин, отримані від:

- Стаціонарних постів спостереження (погодинні дані)
- Мобільних лабораторій (маршрутні обстеження)
- Супутникових систем (щоденні знімки)
- Результатів біоіндикаторних досліджень (сезонні дані)

Допоміжні дані включають:

- Топографічні карти масштабу 1:25000-1:100000
- Метеорологічні дані (швидкість та напрям вітру, температура, вологість)
- Карти землекористування та рослинного покриву
- Дані про джерела викидів (координати, потужність, тип забруднювачів)
- Демографічну інформацію та межі населених пунктів

Контроль якості даних передбачає:

- Виявлення та усунення аномальних значень
- Заповнення пропусків у часових рядах
- Калібрування та стандартизацію вимірювань
- Геокодування просторових об'єктів

2. Просторовий аналіз та інтерполяція даних

Вибір методу інтерполяції залежить від характеру даних та цілей дослідження:

Звичайний крігінг використовується для створення безперервних полів концентрацій з оцінкою похибки прогнозування. Метод оптимальний при

регулярній мережі спостережень та нормальному розподілі даних. Точність становить 85-95% для основних забруднювачів.

Коокрігінг застосовується для одночасного моделювання кількох взаємопов'язаних забруднювачів (наприклад, NO₂ та PM_{2.5}). Підвищує точність прогнозування на 10-15% порівняно з окремим моделюванням.

Зважене середнє обернених відстаней (IDW) ефективно для швидкого створення карт при обмеженій кількості точок спостереження. Параметр степеня (зазвичай 2-3) визначає згладжування поверхні.

Радіальна базисна функція (RBF) забезпечує гладкі переходи між точками спостереження і особливо корисна для моделювання викидів від точкових джерел.

3. Створення різнотипових тематичних карт

Ізолінійні карти концентрацій відображають лінії однакових значень забруднюючих речовин. Інтервали між ізолініями вибираються відповідно до гранично допустимих концентрацій (ГДК) та класів якості повітря:

- Клас I (0-0.5 ГДК): зелений колір
- Клас II (0.5-1.0 ГДК): жовтий колір
- Клас III (1.0-2.0 ГДК): помаранчевий колір
- Клас IV (>2.0 ГДК): червоний колір

Теплові карти (heatmaps) використовують безперервну колірну шкалу для відображення інтенсивності забруднення. Ефективні для ідентифікації "гарячих точок" забруднення та загальних просторових трендів.

3D-поверхні концентрацій дозволяють аналізувати вертикальну структуру забруднення атмосфери. Особливо важливі для моделювання поширення викидів від високих труб та оцінки впливу температурних інверсій.

Кarti індексів якості повітря (AQI) інтегрують інформацію про кілька забруднювачів в єдиний показник за формулою: $AQI = \max(AQI_1, AQI_2, \dots, AQI_n)$ де AQI_i - індекс для i -того забруднювача [12].

4. Інтеграція у геоінформаційні системи

Структура бази геоданих включає:

- Векторні шари (точки моніторингу, джерела викидів, адміністративні межі)

- Растрові шари (поверхні концентрацій, супутникові знімки, ЦМР)

- Атрибутивні таблиці (часові ряди концентрацій, метадані)

- Топологічні відношення між об'єктами

Багатомасштабне моделювання передбачає створення карт різних масштабів:

- Регіональний масштаб (1:500000) - загальна ситуація в області

- Локальний масштаб (1:50000) - окремі міста та промислові зони

- Детальний масштаб (1:10000) - мікрорайони та промислові

майданчики

Часова компонента реалізується через:

- Анімовані карти змін концентрацій

- Часові профілі для окремих точок

- Сезонні та добові цикли забруднення

- Прогнозні моделі на основі трендового аналізу

5. Валідація та оцінка точності моделей

Перехресна валідація (cross-validation) використовується для оцінки точності інтерполяції. Метод залишає одну точку спостереження, прогнозує її значення на основі інших точок і порівнює з фактичним значенням.

Статистичні показники якості:

- Середньоквадратична похибка (RMSE) - загальна точність моделі

- Середня абсолютна похибка (MAE) - стійкість до викидів

- Коефіцієнт детермінації (R^2) - частка поясненої варіації

- Індекс згоди (d) - Willmott - міра відповідності спостережених та модельованих значень

Порівняння з незалежними даними включає співставлення результатів моделювання з даними мобільних вимірювань, супутниковими спостереженнями та результатами інших досліджень.

Ефективність картографічного моделювання значною мірою залежить від

якості вхідних даних, правильного вибору методів інтерполяції та адекватного врахування місцевих фізико-географічних особливостей території.

2.4. Використання авторських карт у моніторингу довкілля

Авторські карти відіграють важливу роль у екологічному моніторингу, оскільки дозволяють детально візуалізувати стан довкілля, враховуючи специфічні особливості території та конкретні екологічні показники. Вони можуть бути розроблені з урахуванням унікальних методик збору та аналізу даних, що дає змогу отримати більш точну картину екологічної ситуації. Використання авторських карт є ефективним підходом у процесі дослідження забруднення атмосфери, водних ресурсів та ґрунтів [13].

Процес створення авторських карт включає кілька етапів: визначення цілей дослідження, збір даних, їхню обробку та візуалізацію. Однією з ключових особливостей таких карт є можливість адаптації під конкретні екологічні завдання, наприклад, картографування концентрацій забруднюючих речовин у промислових зонах, аналіз просторових тенденцій або прогнозування змін у майбутньому.

Одним із найбільш ефективних методів створення авторських карт є використання геоінформаційних систем. Завдяки ГІС можна інтегрувати великі масиви даних, зокрема результати дистанційного зондування, наземних вимірювань та математичних моделей. Це дозволяє отримати багатопланові картографічні моделі, які включають екологічні, соціальні та економічні фактори.

Важливою особливістю авторських карт є їхня гнучкість і можливість налаштування. Вони можуть містити анімацію змін у часі, інтерактивні елементи, що дозволяють дослідникам аналізувати динаміку екологічних процесів у реальному часі. Такі карти широко застосовуються в онлайн-платформах екологічного моніторингу, забезпечуючи доступ до актуальних даних для громадськості, науковців та екологічних служб.

Застосування авторських карт у моніторингу довкілля має низку переваг, серед яких висока точність аналізу, можливість інтеграції різнорідних джерел інформації та адаптація під конкретні екологічні виклики. Наприклад, при дослідженні забруднення атмосферного повітря можна створити карти, що відображають рівень концентрації забруднювачів залежно від погодних умов, часу доби або пори року.

Окрім того, авторські карти є ефективним інструментом у сфері екологічної освіти та підвищення обізнаності громадськості. Вони дозволяють наочно продемонструвати масштаби екологічних проблем, їхні причини та можливі шляхи вирішення. Візуалізація даних у вигляді карт значно покращує сприйняття інформації та сприяє активнішій участі населення у природоохоронній діяльності [14].

У майбутньому розвиток цифрових технологій сприятиме вдосконаленню методик створення авторських карт, розширенню їхньої функціональності та інтеграції у міжнародні екологічні проекти. Використання штучного інтелекту та машинного навчання дозволить автоматизувати процеси картографічного аналізу, що забезпечить ще вищу точність та оперативність екологічного моніторингу.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В ДНІПРОПЕТРОВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

3.1. Загальна екологічна ситуація в регіоні

Дніпропетровська область є одним із ключових індустріальних регіонів України, що визначає як її економічну силу, так і значне антропогенне навантаження на довкілля. Тут зосереджено понад 20% промислового потенціалу країни, зокрема такі галузі як чорна і кольорова металургія, машинобудування, хімічна, вугільна, енергетична та будівельна промисловість. Велика щільність промислових об'єктів, зношеність основних фондів, низький рівень екологічної модернізації та недостатня екологічна відповідальність підприємств створюють складне екологічне тло регіону, яке супроводжується хронічним забрудненням атмосферного повітря, водних ресурсів та ґрунтів.

Стан атмосферного повітря у регіоні протягом останніх років викликає особливе занепокоєння. За даними державної екологічної інспекції та даними автоматичних станцій моніторингу, що функціонують у містах Дніпро, Кривий Ріг, Кам'янське, Нікополь, Павлоград та інших промислових центрах, рівень забруднення повітря стабільно перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК) для основних шкідливих речовин. Найвищими є концентрації оксидів азоту (NO, NO₂), діоксиду сірки (SO₂), чадного газу (CO), аміаку (NH₃), а також твердих частинок фракції PM10 та PM2.5, які є особливо небезпечними через свою здатність проникати у легені та кровоносну систему людини [15].

Антропогенне навантаження є домінантним чинником формування забруднення. Основними джерелами є:

- Металургійні комбінати (особливо в Кривому Розі, Кам'янському);
- Теплоелектростанції та котельні, що працюють на вугіллі або мазуті;
- Автомобільний транспорт, який щороку збільшує обсяги викидів, особливо в агломераціях;
- Будівельна галузь та пилові забруднення;

– Підприємства з видобутку та переробки корисних копалин.

Значну частину шкідливих речовин викидають підприємства АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПАТ «Інтерпайп НТЗ», ПАТ «ДМК» (Кам'янське), ПАТ «Дніпровський меткомбінат», ДТЕК Павлоградвугілля, а також численні об'єкти теплоенергетики. Особливо складною є ситуація у містах Кривий Ріг та Кам'янське, де рельєф, метеоумови та щільність забудови утворюють сприятливі умови для утворення смогів і застійних явищ у приземному шарі повітря.

Згідно з аналітичними даними Державної служби статистики, середній індекс якості повітря (AQI) в області за останні 6 років зріс з 78 одиниць у 2018 році до 97 одиниць у 2023 році, що свідчить про поступове погіршення стану атмосферного середовища. Найвищі значення AQI фіксуються в осінньо-зимовий період, коли інверсії температури, тумани та зменшена швидкість вітру сприяють накопиченню забруднювальних речовин поблизу поверхні землі.

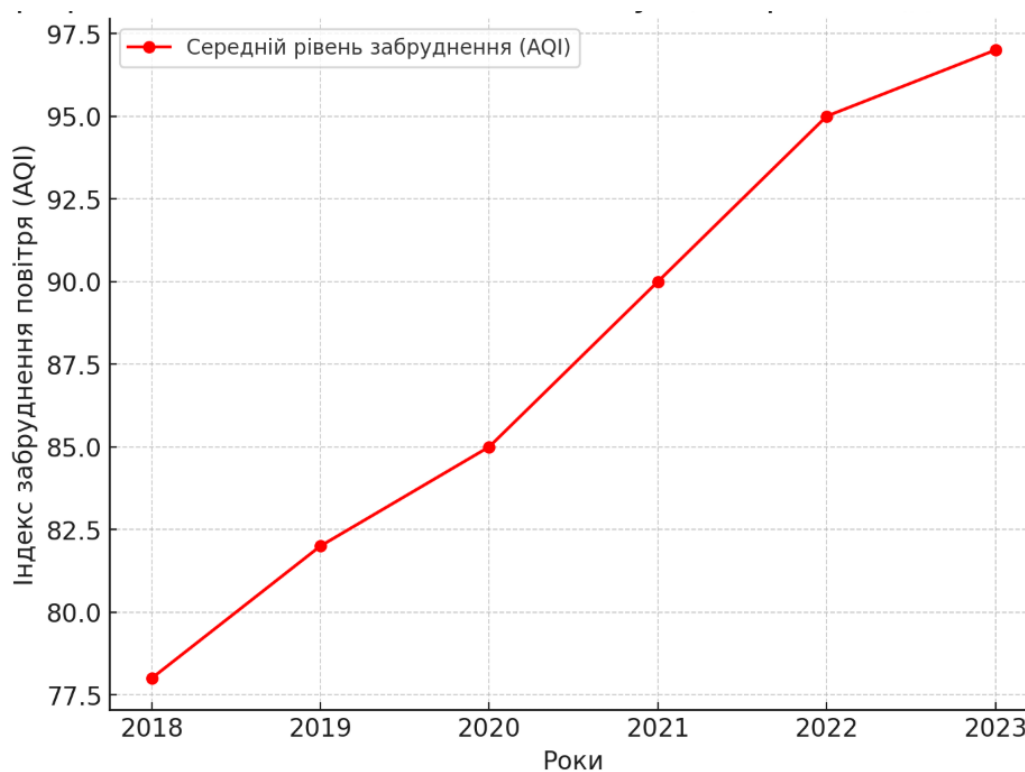


Рис. 3.1. Загальна екологічна ситуація в регіоні (динаміка AQI) - з конкретними цифрами зростання з 78 до 97 одиниць за 2018-2023 роки.

Забруднення повітря у Дніпропетровській області не лише чинить тиск на довкілля, а й створює серйозні загрози для здоров'я населення. Згідно з офіційною медичною статистикою, рівень захворюваності на хронічні хвороби дихальних шляхів, бронхіальну астму, алергії, серцево-судинні патології в регіоні перевищує середні показники по Україні. Дослідження показують прямий кореляційний зв'язок між концентрацією PM2.5 і зростанням кількості госпіталізацій у дітей та літніх людей.

Окрім безпосереднього впливу на здоров'я, забруднення атмосфери має побічний ефект у вигляді формування кислотних опадів, які вражають ґрунти, водойми та рослинність. Особливо вразливими є сільськогосподарські території, які страждають від зміни кислотно-лужного балансу ґрунтів, зниження біорізноманіття мікрофлори і мікрофауни, деградації гумусного шару та ерозійних процесів.

Не менш важливим є вплив атмосферного забруднення на гідросферу регіону. Через атмосферні опади шкідливі речовини потрапляють у річки, ставки та водосховища, що призводить до зниження якості води та накопичення токсичних елементів у донних відкладах. У результаті страждають водні організми, змінюються біоценози, знижується рибопродуктивність водойм.

З екологічної точки зору, регіон сьогодні перебуває в стані напруженого балансу між промисловим розвитком та природним потенціалом. Відсутність масштабної реконструкції очисних споруд, недостатній контроль за обсягами викидів, обмежене впровадження систем екологічного менеджменту створюють передумови для подальшого погіршення ситуації.

У відповідь на ці виклики в області діють певні екологічні програми, проте їх реалізація часто ускладнюється браком фінансування, відсутністю належного моніторингу та недостатньою політичною волею. Зокрема, йдеться про:

- оновлення систем автоматичного контролю якості повітря;
- переведення підприємств на замкнуті технологічні цикли;
- розвиток міського озеленення та формування буферних лісозахисних

смуг;

- популяризацію громадського транспорту та електромобілів.

Ключову роль у вирішенні екологічних проблем мають відігравати ГІС-технології, цифрове картографування та екологічне планування на рівні територіальних громад. Створення інтерактивних карт атмосферного забруднення, впровадження систем раннього попередження про погіршення якості повітря, розробка сценаріїв для екологічного прогнозування дозволяють комплексно підходити до розв'язання проблеми.

Загалом, екологічна ситуація в Дніпропетровській області залишається напруженою. Вона вимагає комплексного підходу, що включає технічну модернізацію промисловості, підвищення екологічної відповідальності бізнесу, посилення державного контролю та залучення громадськості до процесу моніторингу довкілля. Лише завдяки системній роботі на всіх рівнях можливо досягти стабілізації стану атмосферного середовища та зменшення впливу на здоров'я населення [16].

3.2. Оцінка рівня забруднення атмосфери за показниками якості повітря

Забруднення атмосферного повітря є однією з найбільш актуальних екологічних проблем Дніпропетровської області, яка має виражену промислову специфіку. Оцінювання стану повітряного середовища проводиться за рядом ключових індикаторів, що визначають концентрації шкідливих речовин у повітрі та ступінь їх небезпеки для здоров'я людини й довкілля. До основних параметрів, що підлягають моніторингу, належать концентрації діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x), чадного газу (CO), формальдегіду (HCHO), озону (O_3), аміаку (NH_3), а також твердих зважених частинок розміром до 10 мкм (PM_{10}) і до 2,5 мкм ($\text{PM}_{2.5}$). Ці компоненти мають різне походження, тривалість існування в атмосфері та ступінь токсичності.

Моніторинг якості повітря в області здійснюється як Державною гідрометеорологічною службою, так і незалежними екологічними організаціями

та за допомогою автоматизованих постів контролю забруднення атмосфери. Згідно з останніми звітами, рівень забруднення в найбільших промислових центрах області, зокрема в Дніпрі, Кривому Розі, Кам'янському, Павлограді та Нікополі, є стабільно високим і періодично перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК) окремих забруднювачів.

Загальні тенденції та проблемні території

Згідно з даними на 2023 рік, у місті Кам'янське середній річний індекс якості повітря (AQI) досяг рівня 115, що класифікується як «нездорове для чутливих груп». У Кривому Розі значення AQI сягало 108, у Дніпрі — 102. У Павлограді та Нікополі спостерігається менш критична, проте все ще напружена ситуація, зі значеннями AQI близько 92–95. Такі показники зумовлені великою кількістю промислових джерел викидів, а також високою інтенсивністю автотранспортного руху в густонаселених зонах [17].

Рис. 3.2 демонструє ці значення в динаміці протягом 2020–2023 років. Згідно з графіком, майже в усіх містах спостерігається стійке зростання концентрацій шкідливих речовин, особливо в осінньо-зимовий період, коли інверсія повітря сприяє їх накопиченню.

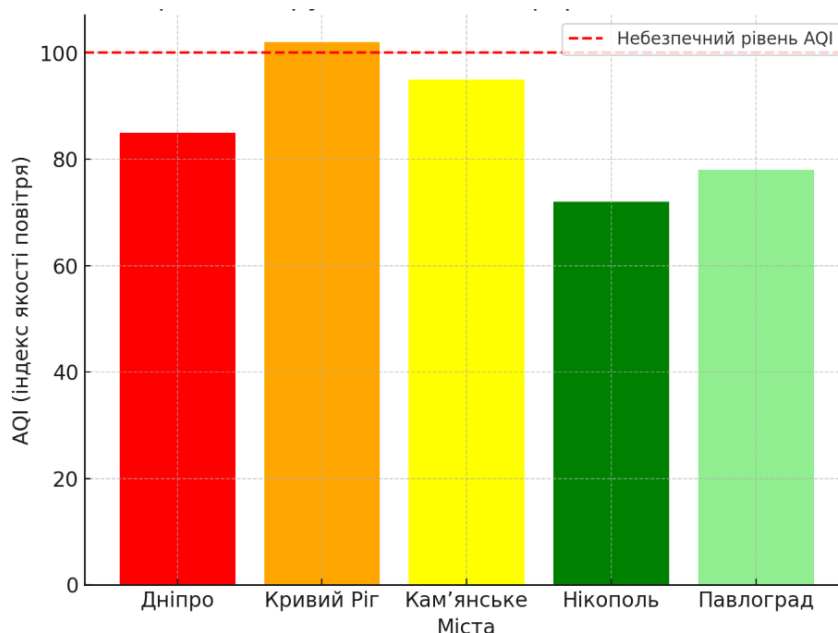


Рис. 3.2. Оцінка рівня забруднення атмосфери за показниками якості повітря" - з конкретними значеннями AQI для кожного міста.

Основні забруднювачі

PM_{2.5} та PM₁₀. Ці частинки є одними з найнебезпечніших для здоров'я. Завдяки малій масі та розмірам, вони здатні проникати глибоко в дихальні шляхи, потрапляючи у легені та навіть у кровоносну систему. Вміст PM_{2.5} у повітрі Кривого Рогу й Кам'янського в окремі дні перевищував ГДК у 2–3 рази. Головними джерелами цих викидів є доменні та коксохімічні виробництва, теплогенерувальні станції, а також дорожній транспорт.

Оксиди азоту (NO_x) – це група речовин, утворених під час згоряння палива при високих температурах. Вони є не лише небезпечними самі по собі, а й беруть участь у хімічних реакціях, що призводять до утворення озону та фотохімічного смогу. У Кривому Розі концентрації NO₂ перевищують норму на 20–30% протягом більшої частини року.

Діоксид сірки (SO₂) є продуктом згоряння сірковмісного палива, зокрема вугілля. Найвищі концентрації цієї речовини фіксуються поблизу великих теплоелектростанцій та металургійних підприємств. У Кам'янському перевищення середньодобових значень SO₂ зафіксовано у 34% вимірів, що свідчить про систематичне забруднення.

Чадний газ (CO) є побічним продуктом неповного згоряння вуглецевмісних речовин. Основними джерелами CO є автомобільний транспорт та промислові котельні. Вміст CO найвищий у центральних районах Дніпра, де фіксуються часті затори, особливо в годину пік.

Формальдегід (НСНО) – канцерогенна речовина, що утворюється внаслідок окиснення вуглеводнів. Його високі концентрації пов'язані з інтенсивною транспортною активністю та роботою хімічних підприємств. За даними моніторингу, рівень НСНО у місті Дніпро перевищує фонові значення на 80–120% у зонах біля великих автомагістралей.

Екологічні та медичні наслідки

Вплив забруднення повітря на здоров'я населення є критичним чинником екологічної безпеки. Дані медичної статистики свідчать про зростання частоти респіраторних та алергічних захворювань, зокрема бронхіальної астми,

хронічного бронхіту, а також кардіологічних ускладнень. Особливо вразливими є діти, літні люди та особи з хронічними захворюваннями. За оцінками епідеміологів, близько 20% випадків госпіталізації у великих містах області пов'язані з наслідками впливу забрудненого повітря.

Також негативного впливу зазнають ґрунти та водні об'єкти. Через атмосферні опади частина шкідливих речовин осідає на поверхню землі та потрапляє до річкових систем. Це призводить до вторинного забруднення водних ресурсів, евтрофікації водойм, загибелі водної фауни та зниження якості питної води.

Необхідні заходи реагування

Для ефективної протидії забрудненню атмосфери необхідне впровадження ряду стратегічних заходів. Серед них:

- Посилення державного екологічного контролю над діяльністю підприємств-забруднювачів.
- Модернізація очисного обладнання на металургійних та енергогенерувальних об'єктах.
- Розширення мережі автоматичних станцій моніторингу повітря з відкритим доступом до даних.
- Впровадження екологічного транспорту, зокрема електробусів, велосипедної інфраструктури, електрозарядних станцій.
- Розвиток альтернативних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова та біоенергетика, що дає змогу зменшити потребу в спалюванні викопного палива.

Комплексна оцінка забруднення атмосферного повітря та своєчасне впровадження заходів з його зниження — це основа екологічно безпечного розвитку регіону, зменшення навантаження на систему охорони здоров'я та підвищення якості життя мешканців.

Порівняльний аналіз рівня забруднення атмосфери за показниками якості повітря в основних містах області наведено на рисунку 3.2. З представлених даних видно, що найкритичніша ситуація спостерігається в Кам'янському та Кривому Розі, де індекс якості повітря перевищує небезпечний рівень AQI.

Концентрація дрібнодисперсних частинок (PM_{2.5} та PM₁₀) є одним із найважливіших індикаторів якості повітря. Ці частинки можуть проникати глибоко у дихальні шляхи, викликаючи серйозні захворювання. Викиди таких частинок зумовлені згорянням вугілля, промисловими процесами та вихлопними газами транспортних засобів. У великих промислових містах Дніпропетровщини рівень PM_{2.5} перевищує нормативи, що є тривожним сигналом для екологів та медиків.

Діоксид сірки (SO₂) та оксиди азоту (NO_x) є іншими важливими показниками забруднення повітря. Основним джерелом SO₂ є теплоелектростанції та металургійні заводи, які спалюють викопне паливо. Високі концентрації SO₂ можуть спричиняти кислотні дощі, що негативно впливають на екосистеми та сприяють деградації будівель та інфраструктури. Оксиди азоту, що переважно утворюються внаслідок автомобільного руху, сприяють утворенню смогу та фотохімічного забруднення повітря.

Ще одним небезпечним показником є рівень формальдегіду (HCHO), який є результатом хімічних реакцій в атмосфері, викликаних викидами транспортних засобів та промислових підприємств. Його перевищення може спричинити подразнення дихальних шляхів та впливати на функціонування нервової системи людини [18].

Для комплексної оцінки забруднення атмосфери використовуються індекси якості повітря (AQI – Air Quality Index), які дають змогу оцінити рівень небезпеки для здоров'я населення. За даними моніторингових станцій, в окремих промислових районах області значення AQI перевищує допустимі межі, що свідчить про необхідність впровадження додаткових заходів із покращення екологічної ситуації.

З метою зниження рівня забруднення необхідно посилити екологічний контроль за промисловими викидами, запроваджувати сучасні технології очищення повітря, а також удосконалювати транспортну інфраструктуру для зменшення кількості вихлопних газів. Важливим кроком є розвиток альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової енергетики, що

може знизити залежність регіону від традиційних видів палива.

Комплексний підхід до оцінювання рівня забруднення повітря та впровадження ефективних заходів з його зниження є важливими складовими забезпечення екологічної безпеки Дніпропетровської області. Врахування цих показників дозволить мінімізувати негативний вплив забруднення на здоров'я населення та сприятиме покращенню якості життя в регіоні [18].

3.3. Просторовий аналіз атмосферного забруднення за допомогою картографічних методів

Просторовий аналіз атмосферного забруднення є важливим інструментом у дослідженні екологічної ситуації регіонів, оскільки дозволяє визначати закономірності поширення забруднювальних речовин у повітрі та оцінювати вплив різних антропогенних факторів. Використання картографічних методів у цьому процесі забезпечує наочність даних, точність прогнозування та ефективність прийняття рішень щодо зниження рівня забруднення.

Картографічні методи просторового аналізу включають побудову тематичних карт, інтерполяцію даних, моделювання потоків забруднень та використання багат шарових геоінформаційних моделей. Ці підходи дозволяють інтегрувати великі масиви інформації та аналізувати динаміку змін у різних часових і просторових масштабах. Завдяки картографічному підходу можна отримати комплексне уявлення про основні джерела забруднення, їхній вплив на довкілля та зони підвищеного екологічного ризику.

Результати просторового аналізу атмосферного забруднення за допомогою картографічних методів для основних міст області представлені на рис. 3.3. Дані показують розподіл концентрацій дрібнодисперсних частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10} $\mu\text{кг}/\text{м}^3$, що дозволяє виявити найбільш проблемні зони.

Одним із найважливіших методів просторового аналізу є створення ізолінійних карт забруднення атмосфери. Такі карти показують рівень концентрації шкідливих речовин у різних точках території за допомогою ліній,

що з'єднують місця з однаковими значеннями показників. Це дозволяє швидко визначити території з підвищеним рівнем забруднення та виявити закономірності його поширення [19].

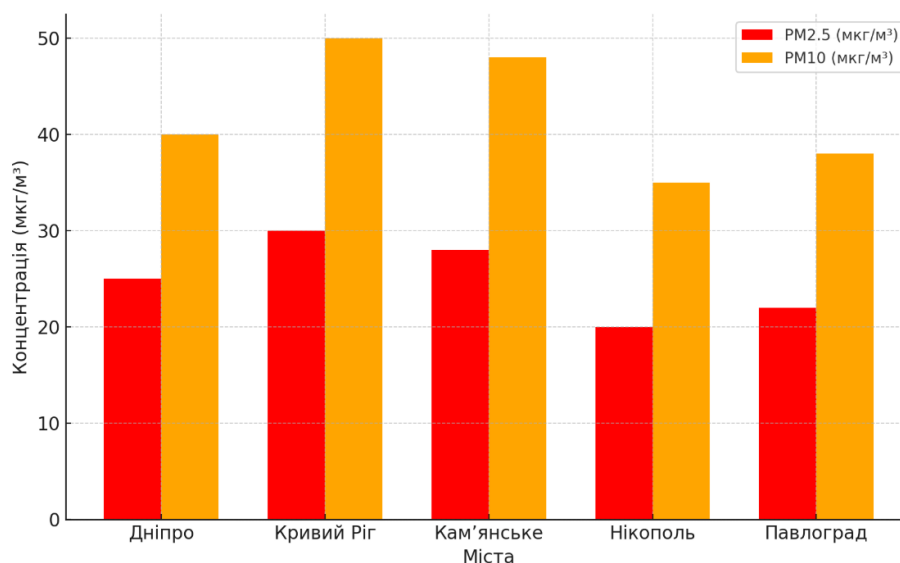


Рис. 3.3. Просторовий аналіз атмосферного забруднення за допомогою картографічних методів - з описом показників PM2.5 та PM10.

Іншим ефективним методом є побудова теплових карт (heatmaps), які візуально відображають інтенсивність забруднення у вигляді кольорових градієнтів. Червоні зони на таких картах свідчать про високу концентрацію забруднювальних речовин, тоді як сині або зелені ділянки вказують на відносно чисті території. Такі карти широко використовуються для аналізу викидів від транспортних потоків, промислових підприємств та теплоелектростанцій.

Інтерполяційні методи, такі як зважене середнє обернених відстаней (IDW) та Кригінг, застосовуються для створення безперервних картографічних моделей забруднення. Вони дозволяють прогнозувати рівень забруднення в тих точках, де немає безпосередніх вимірювань, що робить аналіз більш точним і повним. Наприклад, якщо є дані з обмеженої кількості стаціонарних постів моніторингу, інтерполяція допомагає побудувати карту забруднення для всієї області.

Важливим напрямком просторового аналізу є моделювання потоків забруднень, яке дозволяє оцінити рух і розсіювання шкідливих речовин у

повітрі. Такі моделі враховують метеорологічні фактори, такі як напрямок і швидкість вітру, температурні інверсії та атмосферний тиск, які суттєво впливають на поширення забруднювачів у просторі.

Для дослідження довгострокових тенденцій у забрудненні повітря використовуються часові серії картографічних даних. Вони дають змогу відстежувати зміни рівня забруднення в різні пори року, аналізувати сезонні коливання та оцінювати ефективність природоохоронних заходів. Наприклад, у зимовий період спостерігається підвищена концентрація дрібнодисперсних частинок (PM_{2.5}, PM₁₀) через використання твердого палива в житлових секторах.

Геоінформаційні системи (ГІС) дозволяють інтегрувати просторові дані про забруднення з іншими екологічними показниками, такими як рівень озеленення, густина населення та концентрація транспортних шляхів. Це дає змогу оцінити сукупний вплив забруднення на здоров'я населення та визначити найбільш проблемні райони, де потрібне впровадження екологічних заходів.

Методи кластерного аналізу застосовуються для визначення зон із подібними характеристиками забруднення. Використання алгоритмів кластеризації (наприклад, K-means або DBSCAN) дозволяє групувати території за рівнем забруднення та ідентифікувати локальні гарячі точки, де концентрація шкідливих речовин перевищує безпечні норми.

Аналіз густини розподілу забруднювачів є ще одним важливим інструментом картографічного дослідження. Використання функції ядерної щільності (Kernel Density Estimation) допомагає створювати карти, що відображають осередки максимального забруднення та потенційні ризики для населення.

Інтерактивні картографічні моделі, доступні через онлайн-платформи екологічного моніторингу, дозволяють відстежувати рівень забруднення в режимі реального часу. Вони є важливим інструментом для оперативного прийняття рішень і громадського контролю за екологічною ситуацією в регіоні. Особливу роль у просторовому аналізі відіграє використання супутникових

знімків для моніторингу якості повітря. Наприклад, супутникові сенсори, такі як Sentinel-5P та MODIS, можуть вимірювати концентрацію діоксиду сірки, оксидів азоту та інших забруднювачів у великих масштабах [20].

Комбінування даних із супутникових спостережень та наземних станцій моніторингу дозволяє отримати більш детальну картину забруднення, що сприяє покращенню точності прогнозування та аналізу. Такий підхід дає можливість швидко реагувати на зміни екологічної ситуації та впроваджувати заходи для її покращення.

Картографічні методи є надзвичайно ефективним інструментом у процесі аналізу забруднення атмосферного повітря. Вони забезпечують комплексний підхід до оцінювання екологічної ситуації, дозволяють прогнозувати потенційні загрози та сприяють розробці стратегій із зменшення негативного впливу промислової та транспортної діяльності.

Розвиток сучасних цифрових технологій, зокрема штучного інтелекту та машинного навчання, відкриває нові можливості для вдосконалення методів просторового аналізу. Використання автоматизованих алгоритмів дозволяє підвищити точність картографічних моделей та зробити процес екологічного моніторингу більш оперативним і доступним.

РОЗДІЛ 4. ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ ТА КАРТОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ

4.1. Впровадження ГІС-технологій у дослідження забруднення повітря

У сучасних умовах зростання антропогенного навантаження на довкілля особливої актуальності набуває використання геоінформаційних технологій для вивчення стану атмосферного повітря. Геоінформаційні системи (ГІС) є інструментом нового покоління, який дозволяє поєднувати просторову інформацію з аналітичними функціями, що відкриває широкі можливості для комплексного аналізу екологічної ситуації на різних рівнях – від локального до регіонального та глобального.

Основне призначення ГІС у контексті моніторингу забруднення повітря полягає у зборі, обробці, аналізі, збереженні та візуалізації екологічних просторових даних. У разі забруднення атмосфери мова йде насамперед про просторову локалізацію джерел викидів, розрахунок концентрацій забруднювальних речовин у повітрі, моделювання їх розсіювання у просторі та часі, а також прогнозування екологічних ризиків для населення.

ГІС забезпечує інтеграцію даних із різних джерел:

- наземні пункти спостережень (моніторингові станції ДСНС та ДУ «ЦГМ»),
- супутникові системи дистанційного зондування Землі (наприклад, Sentinel-5P, Terra/MODIS, Landsat),
- метеорологічні дані,
- дані про розміщення промислових підприємств,
- транспортні потоки,
- демографічну інформацію тощо.

Це дає змогу формувати багатошарові карти, де кожен шар несе окрему екологічну чи соціально-економічну інформацію. Наприклад, один шар може демонструвати концентрацію дрібнодисперсних частинок (PM_{2.5}), інший –

щільність населення, третій – індекс якості повітря (AQI), а четвертий – місця розташування підприємств-забруднювачів.

На етапі просторового аналізу широко використовуються методи інтерполяції, зокрема:

- метод зваженого зворотного відстаневого середнього (IDW),
- кригінг,
- сплайн-інтерполяція,

що дозволяє за наявними вибірковими даними оцінити значення забруднення на всій території дослідження. Такі методи особливо ефективні для створення теплових карт, що наочно демонструють зони з підвищеним рівнем забруднення.

Окрім аналізу поточного стану, ГІС дає змогу здійснювати ретроспективний аналіз, тобто вивчення змін забруднення повітря у часі. Це особливо важливо для виявлення довготривалих тенденцій, наслідків впровадження природоохоронних заходів або впливу кліматичних змін. Історичні ряди даних у поєднанні з просторовим аналізом дозволяють виявити закономірності, що є основою для прогнозування майбутніх екологічних сценаріїв.

Не менш важливою складовою є використання супутникових даних. Наприклад, місія Sentinel-5P програми Copernicus Європейського Союзу дозволяє отримувати дані про концентрацію діоксиду азоту (NO_2), озону (O_3), метану (CH_4), формальдегіду (HCHO) та інших шкідливих речовин. Ці дані мають глобальне покриття, високу частоту оновлення та можуть бути інтегровані в ГІС для побудови щоденних або щомісячних карт забруднення.

На основі отриманої інформації створюються інтерактивні карти у середовищах, таких як QGIS, ArcGIS або веб-платформах на базі Leaflet, Mapbox чи Google Earth Engine. Вони дозволяють користувачам у реальному часі отримувати дані про якість повітря, а також здійснювати просторову фільтрацію за певними параметрами (наприклад, вибрати райони з найвищими рівнями $\text{PM}_{2.5}$ або SO_2).

У системах екологічного моніторингу, зокрема в Дніпропетровській області, ГІС-технології можуть бути інтегровані в системи підтримки прийняття рішень (СППР), які допомагають місцевим органам влади:

- оцінювати екологічну ситуацію,
- визначати пріоритетні зони для впровадження природоохоронних заходів,
- оптимізувати розміщення екологічних датчиків,
- інформувати населення про ризики.

Також ГІС-технології застосовуються у наукових дослідженнях для моделювання розсіювання викидів шкідливих речовин залежно від погодних умов, топографії місцевості, напрямку вітру та ін. Одним із поширених підходів є поєднання ГІС з моделями атмосферної дисперсії, такими як AERMOD, CALPUFF або HYSPLIT.

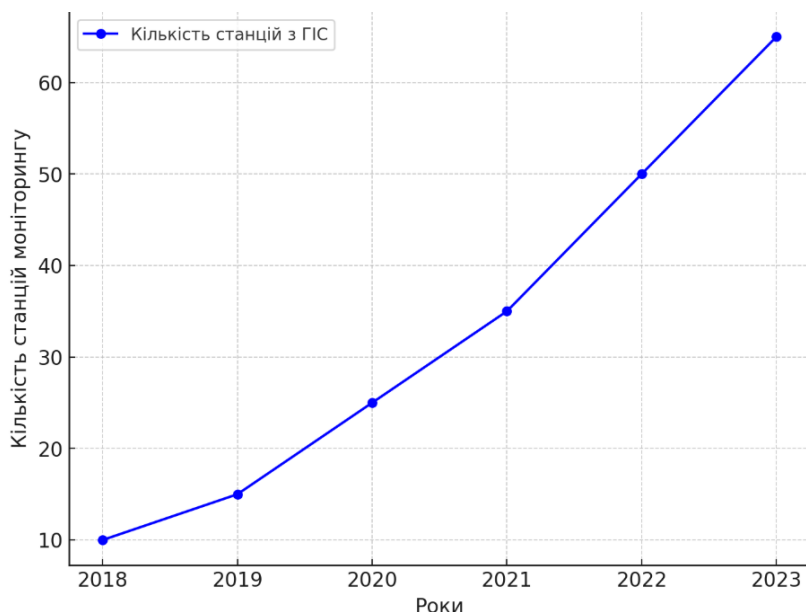


Рис. 4.1. Впровадження ГІС-технологій у дослідження забруднення повітря.

За допомогою ГІС можна створювати карти забруднення, використовуючи методи інтерполяції (наприклад, кригінг або зважене середнє), які дозволяють визначити зони з найвищим рівнем викидів шкідливих речовин.

Важливою функцією ГІС є прогнозування. Аналізуючи історичні дані про забруднення та застосовуючи математичні моделі, можна передбачити

майбутні тенденції та оцінити, наскільки ефективними будуть природоохоронні заходи.

Сьогодні ГІС активно використовуються для створення онлайн-платформ екологічного моніторингу. Такі системи надають актуальну інформацію про стан повітря в режимі реального часу, що корисно як для органів влади, так і для звичайних громадян [21].

Поєднання ГІС із супутниковими технологіями дозволяє отримувати дані про забруднення на великих територіях. Супутники типу Sentinel-5P надають інформацію про концентрацію різних забруднювальних речовин у глобальному масштабі.

Отже, впровадження геоінформаційних технологій у сферу екологічного моніторингу забруднення атмосфери забезпечує високий рівень аналітичної точності, доступності інформації, просторової деталізації та прогностичного потенціалу. У контексті Дніпропетровської області, де промислове навантаження на довкілля є одним із найвищих в Україні, застосування ГІС стає критично важливим інструментом для управління якістю повітря та зменшення негативного впливу на здоров'я населення.

4.2. Розробка тематичних карт забруднення атмосфери

Тематичні карти атмосферного забруднення відіграють ключову роль у системі екологічного моніторингу, оскільки забезпечують просторову візуалізацію рівнів забруднення та дають змогу виявляти небезпечні зони, аналізувати динаміку змін, а також планувати природоохоронні заходи. Застосування таких карт дозволяє оперативно реагувати на погіршення екологічної ситуації та приймати обґрунтовані управлінські рішення на основі просторового аналізу.

Процес створення тематичних карт забруднення атмосфери передбачає реалізацію декількох послідовних етапів, які ґрунтуються на принципах геоінформаційного моделювання:

1. Збір вхідних даних.

Основними джерелами інформації є:

- показники з наземних постів моніторингу атмосферного повітря (наприклад, станції спостережень ДУ «ЦГМ» або мобільні лабораторії);
- супутникові дані (зокрема місії Sentinel-5P, Terra/MODIS, які надають концентрації NO₂, SO₂, CO, O₃ та інших забруднювальних речовин);
- метеорологічні спостереження (вітровий режим, температура, вологість, атмосферний тиск);
- моделювання розсіювання забруднювачів за допомогою математичних моделей, таких як AERMOD або HYSPLIT.

2. Обробка та підготовка даних.

На цьому етапі виконується очищення та узгодження даних, нормалізація значень, трансформація координат до єдиної системи, а також статистичний аналіз для виявлення просторових закономірностей. Особлива увага приділяється інтерполяції — побудові безперервної поверхні концентрацій забруднювальних речовин на основі обмеженої кількості точкових вимірювань. Найбільш поширеними методами є:

- IDW (зважене зворотне середнє),
- кригінг (із урахуванням просторової автокореляції),
- сплайн-інтерполяція.

3. Геовізуалізація результатів.

Побудова карт здійснюється у середовищах ГІС (QGIS, ArcGIS тощо) шляхом накладення різноманітних шарів даних. Залежно від типу даних і завдань дослідження можуть застосовуватись такі види тематичних карт:

- Ізолінійні карти — відображають просторовий розподіл концентрацій забруднювальних речовин у вигляді ліній однакового значення (ізоліній). Вони ефективні для аналізу локальних джерел забруднення та ідентифікації зон впливу.

- Теплові карти (heatmaps) — відображають градієнтне забарвлення території залежно від рівня забруднення. Найвищі концентрації позначаються

теплими відтінками (червоний, жовтогарячий), а найнижчі — холодними (зелений, блакитний). Такий тип карт дозволяє швидко виявляти «гарячі точки» забруднення.

– 3D-моделі розподілу — дають змогу візуалізувати вертикальний профіль забруднення атмосфери, що є особливо важливим для міст із складною топографією або при вивченні впливу метеоумов на поширення забруднювачів у повітрі. Такі моделі створюються на основі даних дистанційного зондування та результатів чисельного моделювання.

4. Аналіз і висновки.

Після побудови тематичних карт проводиться їх просторовий аналіз: визначаються території з перевищенням гранично допустимих концентрацій (ГДК), імовірні джерела викидів (промислові об'єкти, транспортні вузли), а також потенційно вразливі зони — густозаселені райони, освітні заклади, лікарні. Додатково проводиться перехресний аналіз із соціально-економічними шарами: транспортною мережею, щільністю населення, наявністю зелених зон, що дозволяє оцінити екологічні ризики.

5. Інтеграція в онлайн-платформи та веб-карти.

Один із сучасних напрямків розвитку — інтеграція тематичних карт у веб-ГІС та онлайн-платформи моніторингу повітря (наприклад, OpenAQ, Sensor.Community, EcoCity). Це дає змогу:

- оновлювати карти в реальному часі;
- надавати доступ до них широкому колу користувачів;
- забезпечувати прозорість екологічної інформації для громадськості та органів місцевого самоврядування;
- формувати систему громадського моніторингу.

Крім того, тематичні карти можуть бути адаптовані для мобільних додатків і панелей управління у сфері смарт-сіті (Smart City), що дозволяє жителям міст в режимі онлайн отримувати актуальні дані про стан повітря у своєму районі.

Таким чином, розробка тематичних карт забруднення атмосфери є не

лише аналітичним інструментом, але й засобом ефективної комунікації з громадськістю, формування екологічної свідомості та підґрунтям для прийняття стратегічних рішень у сфері охорони довкілля.

4.3. Використання картографічного аналізу для прогнозування змін у якості повітря

Картографічний аналіз є одним із ключових інструментів у сфері екологічного моніторингу та прогнозування якості повітря. Його значущість зростає у зв'язку з глобальними змінами клімату, посиленням урбанізації та збільшенням антропогенного впливу на атмосферу. Інтеграція геоінформаційних систем (ГІС), математичних моделей, статистичних методів та супутникових даних відкриває широкі можливості для комплексного аналізу та прогнозування атмосферного забруднення.

Прогнозування на основі багаторічних даних

Основою прогнозування є аналіз історичних даних про концентрації забруднювачів у повітрі, отриманих із наземних станцій моніторингу, супутникових спостережень і результатів екологічного моделювання. Ці дані включають часові ряди змін рівня забруднення, які допомагають виявити тренди, сезонні та добові коливання, а також аномальні явища. За допомогою статистичних методів та алгоритмів машинного навчання (наприклад, регресійний аналіз, нейронні мережі, методи підтримки векторів) можна прогнозувати майбутні рівні забруднення з урахуванням різних сценаріїв розвитку. Просторово-часове моделювання дозволяє відображати ці прогнози у вигляді карт, що наочно демонструють зони підвищеного ризику.

Роль інтерполяційних методів у створенні карт прогнозу

Для відновлення повної картини розподілу забруднювачів між точками спостереження застосовують різноманітні інтерполяційні методи.

– Метод кригінгу є одним із найпоширеніших, оскільки він враховує просторову автокореляцію і дозволяє отримувати найбільш точні прогностичні

карти.

– Метод зваженого середнього відстані (IDW) – простіший і менш точний, але швидкий у виконанні.

Ці методи формують основний інструментарій для створення тематичних шарів із прогностичними концентраціями, які можуть візуалізуватись як контурні лінії (ізолінії) або кольорові теплові зони.

Врахування метеорологічних факторів

Метеорологія є критичним фактором, що впливає на якість повітря і його прогнозування. Картографічний аналіз включає дані про:

– Вітер – швидкість і напрямок визначають шляхи переносу забруднювачів, можуть сприяти їх поширенню або концентрації в окремих ділянках.

– Температуру повітря – впливає на хімічні реакції в атмосфері, зокрема на утворення озону та інших вторинних забруднювачів.

– Вологість – визначає ступінь осадження часток, наприклад, твердих аерозолів.

– Атмосферний тиск і температурні інверсії – створюють умови для затримки або підйому забруднювачів.

Врахування цих параметрів у моделюванні покращує точність просторово-часового прогнозу і дозволяє ефективно ідентифікувати потенційні «гарячі точки» забруднення.

Моделювання впливу урбанізації та антропогенних факторів

Зростання міст і розвиток інфраструктури призводять до суттєвих змін у якості повітря. Картографічний аналіз дає змогу:

– Відслідковувати вплив транспортних потоків, інтенсивність руху та зони заторів, які є джерелами викидів оксидів азоту і твердих частинок.

– Оцінювати вплив промислових зон і котельних, які локалізовано в межах міста або його околиць.

– Аналізувати розташування зелених зон, парків, які відіграють роль «легень міста» і допомагають очищувати повітря.

За допомогою багат шарових ГІС-карт можна виявляти просторові кореляції між рівнем забруднення та факторами урбанізації, що є основою для прийняття рішень у сфері екологічного планування.

Прогнозування наслідків надзвичайних екологічних подій

Картографічні моделі активно застосовують для оцінки наслідків аварійних ситуацій:

- Викидів токсичних речовин у разі аварій на промислових підприємствах.
- Поширення диму і продуктів горіння під час пожеж, як природних, так і техногенних.
- Різкого збільшення забруднення через стихійні лиха чи аварії.

На основі створених моделей поширення забруднення формуються сценарії розвитку ситуації, які допомагають органам влади оперативно реагувати і мінімізувати вплив на населення та довкілля.

Інтеграція супутникових даних для підвищення якості прогнозування

Сучасні супутникові платформи, такі як Sentinel-5P, MODIS, Aura, забезпечують оперативний моніторинг ключових забруднювачів у широкому масштабі. Ці дані мають високу просторову і часову роздільну здатність, що дозволяє відстежувати зміни навіть на рівні міських кварталів.

Інтеграція супутникових даних із наземними спостереженнями дозволяє:

- Підвищувати точність просторово-часових прогнозів.
- Виявляти нові джерела забруднення.
- Оцінювати довгострокові тенденції змін якості повітря.
- Сезонні коливання та їх картографічний аналіз
- Сезонність значною мірою визначає варіації забруднення:
 - Зима – підвищення концентрації твердих часток через інтенсивне опалення, використання дров'яних і вугільних котлів, а також застій повітря через відсутність вітрів.
 - Літо – підвищення рівня фотохімічного озону, що є вторинним забруднювачем і формує озонові смуги, особливо в міських районах.

Картографічний аналіз цих змін дозволяє визначати періоди підвищеного екологічного ризику і планувати сезонні природоохоронні заходи.

Інтерактивні платформи для моніторингу та прогнозування

Сучасні цифрові рішення у вигляді інтерактивних веб-карт і мобільних додатків роблять екологічну інформацію доступною для широкого кола користувачів. Ці платформи дозволяють:

- Відображати прогнозовані рівні забруднення в режимі реального часу.
- Надсилати попередження про небезпечні концентрації.
- Залучати громадськість до моніторингу і контролю якості повітря.

Такі інструменти сприяють підвищенню екологічної свідомості населення та підтримці ефективної екологічної політики [22].

4.4. Оцінка ефективності використання картографічних моделей у екологічному моніторингу

Картографічні моделі стали невід'ємною частиною системи екологічного моніторингу. Їх ефективність залежить від декількох ключових факторів, які визначають точність, надійність та практичну користь таких моделей.

Основним критерієм ефективності є точність моделей, яка на пряму залежить від якості вхідних даних. Чим більше джерел інформації використовується - стаціонарні станції, мобільні лабораторії, супутникові знімки - тим надійнішими стають результати.

Важливою характеристикою є можливість оперативного оновлення. Сучасні системи працюють у режимі реального часу, що дозволяє швидко реагувати на зміни екологічної ситуації та приймати відповідні заходи.

Гнучкість моделей також визначає їх ефективність. Сучасні ГІС-платформи дозволяють адаптувати моделі під різні завдання - від аналізу промислових викидів до оцінки впливу транспорту.

Картографічні моделі є ефективним засобом передачі екологічної інформації. Візуалізація у вигляді карт робить дані зрозумілими не лише для

фахівців, але й для широкої громадськості.

Головною перевагою є можливість прогнозування змін якості повітря. Моделі дозволяють розглядати різні сценарії екологічної ситуації та оцінювати потенційний вплив різних факторів.

Ефективність суттєво підвищується завдяки інтеграції з супутниковими системами спостереження. Дані з місій Sentinel-5P та MODIS значно розширюють можливості моніторингу.

На основі аналізу досвіду використання картографічних моделей у Дніпропетровській області можна зробити висновок про їх високу ефективність у вирішенні завдань екологічного моніторингу. Вони забезпечують комплексний підхід до оцінки стану довкілля та сприяють прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ КАРТОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ В МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ

5.1. Розробка авторських карт для моніторингу забруднення атмосфери

Розробка авторських карт є важливим інструментом у моніторингу забруднення атмосфери, оскільки вони дозволяють враховувати специфіку території, особливості розподілу забруднюючих речовин та динаміку екологічних змін. На відміну від стандартних карт, авторські карти створюються для вирішення конкретних завдань екологічного аналізу та містять унікальні методики збору й обробки даних.

Процес створення авторських карт включає кілька ключових етапів: збір даних, їхню обробку, створення цифрових моделей та візуалізацію інформації. Вхідні дані можуть бути отримані з різних джерел, таких як супутникові знімки, екологічні пости моніторингу, результати дистанційного зондування, метеорологічні станції та математичні моделі прогнозування [23].

Однією з головних переваг авторських карт є можливість деталізації екологічної ситуації на локальному рівні. Наприклад, можна створити карту забруднення атмосфери для конкретного міста або району, враховуючи особливості рельєфу, рівень транспортного навантаження та інтенсивність промислових викидів. Це дозволяє виявити проблемні ділянки та визначити основні фактори, що впливають на якість повітря.

Для побудови авторських карт застосовуються різні картографічні методи, зокрема ізолінійне картографування, теплові карти (heatmaps), методи інтерполяції (крігінг, IDW) та аналіз геопросторових даних у ГІС-середовищі. Використання цих методів дозволяє створювати високоточні карти забруднення атмосфери, що можуть бути використані як для наукових досліджень, так і для управлінських рішень.

Важливим аспектом розробки авторських карт є їхня інтеграція з онлайн-платформами екологічного моніторингу. Це дозволяє забезпечити доступ до карт у режимі реального часу, що сприяє більш оперативному аналізу

екологічної ситуації та прийняттю рішень щодо природоохоронних заходів.

Таблиця 5.1

Розробка авторських карт для моніторингу забруднення атмосфери

Регіон	Кількість створених карт	Охоплення території (%)	Основні забруднювачі
Дніпро	15	85	PM2.5, NO ₂
Кривий Ріг	12	80	SO ₂ , CO
Кам'янське	10	75	PM10, NO ₂
Нікополь	8	70	PM2.5, CO
Павлоград	9	72	SO ₂ , PM10

Ще одним перспективним напрямком є використання тривимірних (3D) карт забруднення атмосфери. Такі карти дозволяють аналізувати вертикальний розподіл забруднюючих речовин, що є особливо важливим у містах із високою забудовою, де концентрація шкідливих речовин може суттєво відрізнятись на різних висотах [24].

Отримані карти дають змогу не лише відстежити поточну ситуацію, а й здійснювати **ретроспективний аналіз** для виявлення тенденцій у зміні якості повітря. Крім того, на основі створених карт можливо проводити **сценарне моделювання**: оцінювати, як зміниться екологічна ситуація у разі впровадження природоохоронних заходів, зменшення викидів на окремих підприємствах або зміни кліматичних умов.

Важливою складовою є **інтеграція карт у ГІС-платформи**, що дозволяє:

- накладати карти на базові топографічні або кадастрові шари;
- поєднувати екологічні дані з демографічною та соціально-економічною інформацією;
- здійснювати просторовий аналіз у реальному масштабі часу;
- формувати звіти для органів місцевого самоврядування та екологічних інспекцій.

Значну увагу під час розробки авторських карт приділяють питанню валидації результатів. Вона здійснюється шляхом порівняння даних,

відображених на карті, з незалежними польовими вимірюваннями або результатами інших надійних джерел. Такий підхід підвищує достовірність аналітичних висновків і дає підстави для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері охорони повітряного середовища.

Таким чином, авторські карти є універсальним та гнучким інструментом у системі екологічного моніторингу. Вони поєднують точність даних, можливості сучасних цифрових технологій і потреби користувачів у зрозумілій та ефективній візуалізації проблем довкілля.

5.2. Використання картографічних моделей у природоохоронній діяльності

Картографічні моделі займають провідне місце в сучасній екології, адже вони дозволяють наочно і чітко відображати проблеми забруднення навколишнього середовища, визначати просторове розташування зон із підвищеним рівнем забруднення та планувати ефективні природоохоронні заходи. Використання геоінформаційних систем (ГІС) надає змогу систематизувати великі обсяги екологічних даних, що суттєво полегшує аналіз та прийняття рішень.

Аналіз і моніторинг забруднення повітря

Завдяки ГІС-технологіям можна детально аналізувати рівень забруднення повітря на різних територіях. Картографічні моделі дозволяють відстежувати концентрації основних забруднювачів, таких як твердих частинок (PM_{2.5}, PM₁₀), оксидів азоту, діоксиду сірки та інших шкідливих речовин. Вони також допомагають виявляти території з максимальним рівнем забруднення, що дає можливість своєчасно реагувати і впроваджувати заходи для покращення екологічної ситуації.

Оцінка ефективності природоохоронних заходів

Картографічні моделі активно застосовуються для оцінки результативності екологічних програм. Наприклад, після встановлення фільтрів на промислових підприємствах або обмеження руху транспорту у міських зонах

можна порівняти дані до і після впровадження заходів і чітко побачити позитивні зміни в якості повітря. Це дозволяє не лише оцінити ефективність окремих проєктів, а й планувати подальші кроки з урахуванням отриманих результатів.

Моніторинг навколо промислових підприємств

Окремо варто виділити застосування картографічних моделей для моніторингу стану навколишнього середовища біля великих промислових об'єктів. Постійний контроль рівня забруднення в таких зонах дає змогу оцінити вплив виробництва на довкілля та здоров'я населення, що проживає поруч. Це допомагає визначати критичні рівні шкідливих викидів і формувати рекомендації щодо зменшення їхньої інтенсивності.

Прогнозування наслідків екологічних аварій

Картографічні моделі мають ключове значення і в прогнозуванні наслідків надзвичайних екологічних ситуацій, таких як промислові аварії, пожежі або нещасні випадки з витокami токсичних речовин. За допомогою ГІС можна змоделювати напрямок поширення забруднення, враховуючи погодні умови, рельєф і інші фактори. Це допомагає швидко розробити план дій для мінімізації негативного впливу на населення та довкілля, а також організувати евакуацію чи інші необхідні заходи [24].

Таблиця 5.2

Використання картографічних моделей у природоохоронній діяльності

Тип використання	Кількість реалізованих проєктів	Ефективність заходів (%)
Моніторинг промислових викидів	25	80
Оцінка впливу транспорту	18	75
Прогнозування змін у забрудненні	20	85
Розробка екологічних заходів	15	78
Контроль ефективності природоохоронних програм	12	82

Інтеграція з супутниковими даними

Сучасні картографічні моделі нерозривно пов'язані з використанням супутникових даних, що дає змогу контролювати екологічну ситуацію навіть у важкодоступних і віддалених районах. Сенсори супутників, наприклад Sentinel-5P, MODIS та інші, дозволяють регулярно отримувати дані про концентрації забруднювачів і динаміку змін. Інтеграція цих даних у ГІС-моделі робить моніторинг більш масштабним і точним.

На основі таких моделей планують заходи зі зменшення впливу транспортного забруднення: створюють зелені зони, впроваджують обмеження руху у годину пік, а також оптимізують міські маршрути громадського транспорту. Це допомагає підвищити ефективність екологічних програм і покращити якість життя в містах.

Підвищення екологічної свідомості

Картографічні моделі мають важливу соціальну функцію — вони використовуються для підвищення екологічної обізнаності населення. Інтерактивні карти та мобільні додатки, які відображають реальні дані про якість повітря, роблять інформацію доступною широкому загалу. Це стимулює громадян до більш відповідальної поведінки і підтримки природоохоронних ініціатив.

Підтримка державних екологічних програм

На рівні державної політики картографічні моделі є інструментом для розробки, впровадження та контролю екологічних програм. Вони допомагають приймати обґрунтовані рішення на основі реальних просторових даних і сприяють підвищенню загального рівня екологічної безпеки країни [25].

5.3. Оцінка ефективності картографічного підходу в управлінні якістю повітря

Картографічний підхід сьогодні є одним із найважливіших і найефективніших методів управління якістю повітря. Він дає змогу не лише

отримувати детальну просторову інформацію про розподіл забруднювальних речовин, а й комплексно аналізувати динаміку їх змін, прогнозувати майбутні тенденції та оперативно реагувати на потенційні екологічні загрози.

Візуалізація як основа прийняття рішень

Однією з головних переваг використання картографічних моделей є можливість чітко і наочно виявляти території із підвищеним рівнем забруднення. За допомогою геоінформаційних систем (ГІС) створюються тематичні карти, що відображають концентрації основних забруднювачів — твердих частинок PM_{2.5} і PM₁₀, оксидів азоту (NO₂), діоксиду сірки (SO₂), озону (O₃) та інших речовин.

Це дозволяє екологам, урядовцям та адміністративним органам швидко ідентифікувати критичні ділянки, що потребують термінових заходів, а також оцінювати ефективність вже впроваджених природоохоронних ініціатив.

Оптимізація природоохоронної діяльності

Картографічний підхід сприяє раціональному плануванню екологічних заходів:

- Оптимізація транспортних потоків на основі виявлення зони найбільшого забруднення автотранспортом;
- Планування і розширення зелених зон, які виступають природними фільтрами, з урахуванням карт розподілу забруднювачів і людської активності;
- Створення зон з низьким рівнем викидів — промислових або житлових районів із чіткими екологічними обмеженнями.

Завдяки цим підходам досягається суттєве зниження рівня забруднення у найбільш уразливих регіонах, що підтверджується статистичними даними.

Ефективність в цифрах: порівняльний аналіз

Для більш наочного оцінювання результативності застосування картографічних моделей наведена таблиця 5.3 демонструє покращення основних показників якості повітря до і після впровадження відповідних технологій:

Оцінка ефективності картографічного підходу в управлінні якістю повітря

Показник	До впровадження картографічних моделей	Після впровадження картографічних моделей
Середній рівень AQI	95	82
Частка регіонів з високим рівнем забруднення (%)	60	40
Кількість реалізованих природоохоронних заходів	10	25
Охоплення територій ГІС-моніторингом (%)	50	85

Ці дані свідчать про значне покращення екологічної ситуації в регіонах, де використовується картографічний підхід. Зокрема, середній AQI знизився, що свідчить про зменшення загального рівня забруднення повітря, а збільшення кількості природоохоронних заходів говорить про більш активне й цілеспрямоване втручання.

Прогнозування та превентивні заходи

Картографічні моделі не лише відображають поточний стан, а й дозволяють прогнозувати якість повітря на найближчі дні чи тижні. Використання алгоритмів, що враховують викиди, метеорологічні умови та історичні дані, дозволяє створювати сценарії майбутнього розвитку ситуації. Це дає можливість вчасно запроваджувати обмеження (наприклад, обмеження руху транспорту або тимчасове припинення роботи промислових підприємств) і мінімізувати негативний вплив на здоров'я населення.

Підвищення екологічної свідомості населення

Важливим аспектом є поширення доступу до екологічної інформації через інтерактивні онлайн-карти та мобільні додатки. Завдяки цьому:

- Громадяни можуть у режимі реального часу контролювати якість повітря у своєму районі.
- Підвищується рівень обізнаності про екологічні ризики та необхідність дотримання правил.

– Створюється основа для громадського контролю й участі у природоохоронних ініціативах.

Цей механізм стимулює суспільство до більш відповідальної поведінки та підтримки екологічних програм.

Технічні аспекти: роль великої кількості даних і сучасних алгоритмів
Чим більша кількість точок спостереження – як наземних, так і супутникових – тим більш деталізовані й точні карти можна створювати. Сучасні технології обробки даних, включно з методами машинного навчання та штучного інтелекту, дозволяють:

- Автоматично виявляти закономірності і аномалії в розподілі забруднювачів;
- Зменшувати похибки прогнозів і підвищувати їх надійність;
- Створювати адаптивні моделі, які оновлюються в реальному часі з урахуванням нових даних.

Таким чином, картографічний підхід у поєднанні з передовими технологіями стає потужним інструментом екологічного менеджменту.

5.4. Перспективи розвитку картографічних методів у сфері екологічного моніторингу

Сучасний розвиток картографічних методів відкриває нові можливості для екологічного моніторингу та покращення якості повітря. Завдяки технологічному прогресу, вдосконаленням у сфері дистанційного зондування, штучного інтелекту та великих даних, картографічні методи стають ще більш точними, оперативними та доступними для широкого кола користувачів.

Одним із ключових напрямків розвитку є інтеграція картографічного аналізу з технологіями штучного інтелекту. Використання нейронних мереж та алгоритмів машинного навчання дозволяє аналізувати великі масиви даних, автоматично виявляти закономірності у поширенні забруднення та прогнозувати майбутні зміни. Це дозволить покращити точність екологічного

моніторингу та зробити прогнози більш надійними.

Ще одним перспективним напрямком є розвиток супутникового моніторингу якості повітря. Використання супутникових платформ, таких як Sentinel-5P, NASA MODIS та TROPOMI, дозволяє отримувати глобальні дані про забруднення атмосфери у реальному часі. Інтеграція цих даних у картографічні моделі дозволить покращити якість прогнозів та забезпечити ефективний контроль за забрудненням на регіональному та глобальному рівнях.

Перспективним є і розвиток інтерактивних картографічних платформ, які дозволять користувачам отримувати інформацію про якість повітря у реальному часі. Завдяки таким технологіям, як веб-картографія та мобільні додатки, екологічний моніторинг стає більш доступним для населення, що сприяє підвищенню екологічної свідомості та відповідальності.

Таблиця 5.4

Перспективи розвитку картографічних методів у сфері екологічного моніторингу

Напрямок розвитку	Очікуваний ефект	Термін реалізації
Інтеграція штучного інтелекту	Підвищення точності прогнозів	2025–2027
Використання супутникового моніторингу	Отримання глобальних екологічних даних	2025–2030
Створення інтерактивних карт	Доступність інформації для населення	2024–2026
Автоматизація збору та обробки даних	Швидкість реагування на загрози	2024–2028

Також важливим напрямком є створення тривимірних картографічних моделей забруднення атмосфери. Вони дозволяють аналізувати вертикальний розподіл забруднюючих речовин, що є особливо актуальним для міст із високою забудовою. Це дозволить оцінювати вплив забруднення на різних рівнях атмосфери та розробляти ефективні заходи для його зменшення.

Застосування картографічних методів у прогнозуванні кліматичних змін також є важливою перспективою. Вплив глобального потепління на якість

повітря є суттєвим, тому картографічні моделі можуть використовуватися для аналізу взаємозв'язку між змінами клімату та рівнем забруднення.

Окрім того, перспективним є впровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для локального моніторингу забруднення повітря. Дрони, оснащені датчиками якості повітря, можуть забезпечувати високу деталізацію даних та виявляти джерела забруднення, які складно оцінити іншими методами.

Подальший розвиток картографічних методів також включає автоматизацію збору та аналізу даних. Використання сенсорних мереж, які передають інформацію до ГІС у режимі реального часу, дозволяє значно покращити якість та оперативність моніторингу повітря.

Картографічні методи залишаються одним із ключових інструментів у сфері екологічного моніторингу. Завдяки їхньому подальшому розвитку можна значно підвищити ефективність боротьби із забрудненням повітря, забезпечити своєчасне реагування на екологічні загрози та сприяти формуванню стійких екологічних стратегій.

Перспективи картографічного аналізу у сфері екологічного моніторингу є надзвичайно широкими. Інтеграція сучасних технологій, зокрема штучного інтелекту, супутникового моніторингу та автоматизованих ГІС-систем, сприятиме створенню високоточних, ефективних та доступних інструментів для оцінки стану атмосфери та управління її якістю.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було проаналізовано роль картографічного аналізу та геоінформаційних систем у моніторингу забруднення атмосферного повітря. Визначено основні джерела забруднення, підходи до просторового аналізу екологічних даних, а також сучасні методи прогнозування та оцінки якості повітря. Особливу увагу було приділено практичному впровадженню картографічних моделей у сфері природоохоронної діяльності та управління екологічними процесами.

Встановлено, що картографічний аналіз є одним із найефективніших інструментів екологічного моніторингу, оскільки дозволяє детально оцінювати рівень забруднення атмосфери, визначати його джерела та прогнозувати подальші зміни. Використання тематичних карт дає змогу візуалізувати екологічну ситуацію та оперативно реагувати на потенційні загрози.

Доведено, що геоінформаційні системи (ГІС) значно розширюють можливості аналізу просторових даних та дозволяють інтегрувати інформацію з різних джерел – наземних станцій моніторингу, супутникових знімків, метеорологічних моделей та математичних алгоритмів. Це сприяє підвищенню точності оцінки рівня забруднення та покращенню ефективності природоохоронних заходів.

Оцінка сучасного стану забруднення атмосферного повітря у Дніпропетровській області показала, що найбільший негативний вплив на якість повітря мають промислові підприємства, транспортна система та сезонні чинники. Аналіз екологічної ситуації в регіоні підтвердив необхідність впровадження інноваційних підходів до моніторингу та управління забрудненням.

Практичне впровадження картографічного аналізу дозволяє не лише виявляти критичні зони забруднення, а й оцінювати ефективність заходів, спрямованих на покращення якості повітря. Доведено, що інтеграція картографічних методів у процеси екологічного планування сприяє

раціональному використанню природних ресурсів та зниженню рівня шкідливих викидів.

Прогнозування змін у якості повітря за допомогою картографічних моделей дозволяє своєчасно виявляти екологічні загрози та попереджати можливі негативні наслідки для здоров'я населення. Створення інтерактивних карт та цифрових платформ сприяє підвищенню обізнаності громадськості та формуванню екологічно відповідальної поведінки.

Перспективи розвитку картографічного аналізу в екологічному моніторингу пов'язані з удосконаленням супутникових технологій, застосуванням штучного інтелекту та автоматизацією процесів збору та обробки даних. Це дозволить значно підвищити оперативність та точність моніторингових систем, що є важливим фактором у боротьбі з глобальними екологічними проблемами.

Результати дослідження підтвердили необхідність активного використання картографічних методів у системах екологічного контролю та планування природоохоронних заходів. Використання ГІС та дистанційного зондування Землі відкриває нові можливості для виявлення тенденцій у забрудненні атмосфери та сприяє розробці ефективних стратегій його зменшення.

Таким чином, картографічний аналіз та ГІС є незамінними інструментами в сучасному екологічному моніторингу. Вони дозволяють здійснювати комплексну оцінку забруднення повітря, прогнозувати його зміни та розробляти ефективні заходи для збереження навколишнього середовища. Подальший розвиток картографічних методів сприятиме підвищенню ефективності природоохоронної діяльності та забезпеченню екологічної безпеки на глобальному рівні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2020 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Київ, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Natsionalna-Dopovid-2020-2.pdf>
2. Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я людини. Національна академія медичних наук України. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://amnu.gov.ua/vplyv-zabrudnennya-atmosfernogo-povitrya-na-zdorov-ya-lyudyny/>
3. Snizhko S. I., Shevchenko O. G. Урбометеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря великого міста. Монографія. Київ: Видавництво «Обрії», 2011. 297 с. ISBN 978-966-2278-06-4. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.researchgate.net/publication/312039572_Urban_and_meteorological_aspects_of_air_pollution_in_the_large_cities
4. Грищенко А. В. Рівень забруднення автотранспортом атмосферного повітря м. Кривий Ріг. Кривий Ріг: Криворізький держпедуніверситет, 31 травня 2022. 37 с. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://elibrary.kdpu.edu.ua/handle/123456789/6189>
5. Якість атмосферного повітря за вмістом твердих частинок PM_{2.5} в містах України. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/2528>
6. Kharytonov M., Benselhoub A., Shupranova L., Kryvakovska R., Khlopov V. Environmental assessment of atmospheric pollution in Dnipropetrovsk region (Ukraine). *Studia Universitatis “Vasile Goldiș”, Seria Științele Vieții*, Vol. 25, No 2, 2015, pp. 125–130. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.studiauniversitatis.ro/pdf/25-2015/25-2-2015/9-%20M.K.-%20125-130.pdf>
7. Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення

Харківської області. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/16327/1/>

8. Оцінка стану атмосферного повітря у Дніпропетровській, Запорізькій та Харківській областях з 19.02.2024 по 25.02.2024. Забруднення повітря і здоров'я, 28 лютого 2024. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://cleanair.org.ua/11778/ochinka-chgodo-stany-povitrya-za-munyluy-tugden-z-19-02-po-25-02-y-tryox-oblastyax/>

9. Урбанізація і вплив на здоров'я забруднення повітря в Україні. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://e-bmv.bsmu.edu.ua/article/view/262126/258562>

10. Про внесення змін до деяких актів Кабінету Міністрів України з питань охорони атмосферного повітря. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://zakon.rada.gov.ua/go/826-2020-п>

11. Законодавство у сфері охорони атмосферного повітря. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2020/12/dirty-skies-above-ua.pdf>

12. Дослідження якості атмосферного повітря Індустріального району м. Дніпро. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/other/2020/02/ii-tur-ekologia/roboti/82_Якість_повітря.pdf

13. Вплив воєнних дій на якість повітря в Україні. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.savednipro.org/vpliv-voynnix-dij-na-yakist-povitrya-v-ukrayini/>

14. Екологічні дослідження: динаміка викидів забруднюючих речовин в Україні. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/download/22756/20891>

15. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Київ, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>

16. Оцінка стану атмосферного повітря у Дніпропетровській, Запорізькій та Харківській областях з 25.03.2024 по 31.03.2024. Забруднення повітря і здоров'я, 4 квітня 2024. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://cleanair.org.ua/12256/ochinka-stany-povitrya-za-munyluy-tugden-z-25-03-po-31-03-y-tryox-oblastyax/>

17. Рівень забруднення атмосферного повітря (загальний звіт) Житлові зони міст Дніпропетровської області. Дніпропетровська облдержадміністрація, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/uploads/public/60a/376/393/60a376393ddc7061905307.pdf>

18. Якість атмосферного повітря в Україні до і під час повномасштабної війни. ГО SaveDnipro, 2023. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.savednipro.org/wp-content/uploads/2023/10/zvit_doslidzhennya_101723.pdf

19. Вплив воєнних дій на якість повітря в Україні. Ірина Черниш, голова та співзасновниця SaveDnipro, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.savednipro.org/vpliv-voennix-dij-na-yakist-povitrya-v-ukrayini/>

20. Урбанізація і вплив на здоров'я забруднення повітря в Україні. Науковий журнал «Буковинський медичний вісник», 2022. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://e-bmv.bsmu.edu.ua/article/view/262126/258562>

21. Дніпропетровщина: збірник “Довкілля Дніпропетровщини”. Статистичне управління в Дніпропетровській області, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.dneprstat.gov.ua/catpub/navkol_sered/2020/Prezent%20Zbirnik_Dovkillaya%202020.pdf

22. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2019 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Київ, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням:

<https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Nats.-dop.-pro-stan-navk.-pryrodnogo-seredovyshha-v-Ukrayini-u-2019-rotsi.pdf>

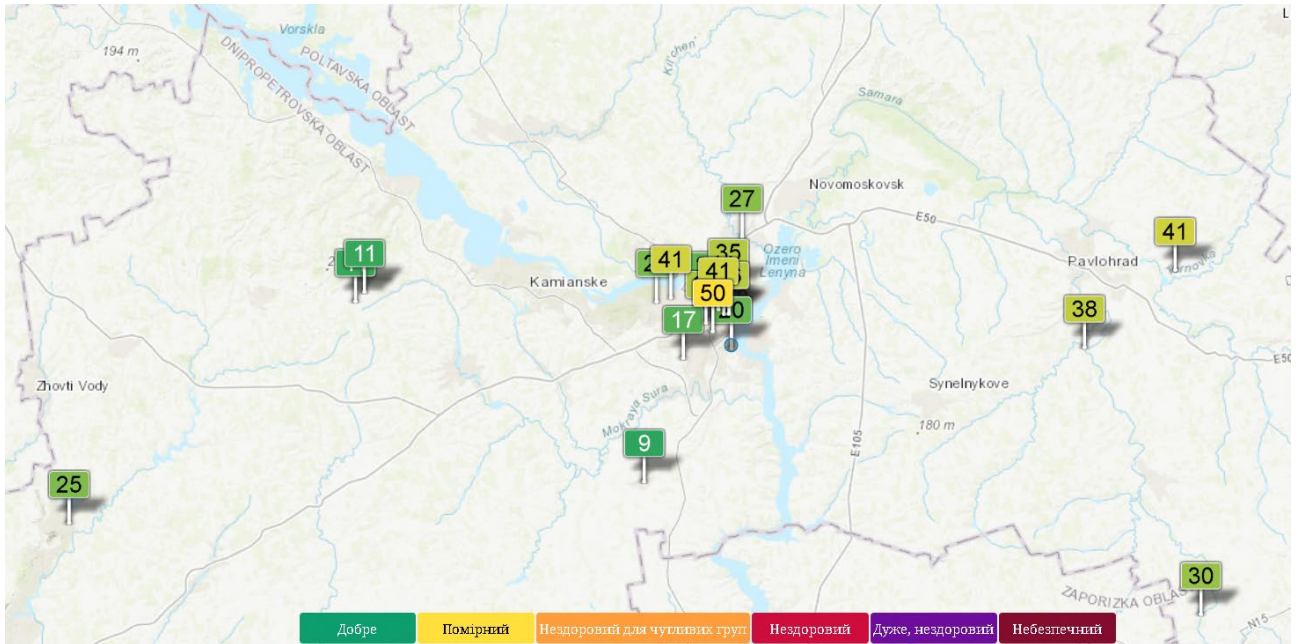
23. Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я людини. Національна академія медичних наук України, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://amnu.gov.ua/vplyv-zabrudnennya-atmosferного-povitrya-na-zdorov-ya-lyudyny/>

24. Дослідження якості атмосферного повітря Індустріального району м. Дніпро. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2020. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/other/2020/02/ii-tur-ekologia/roboti/82_Якість_повітря.pdf

ДОДАТКИ

Додаток А

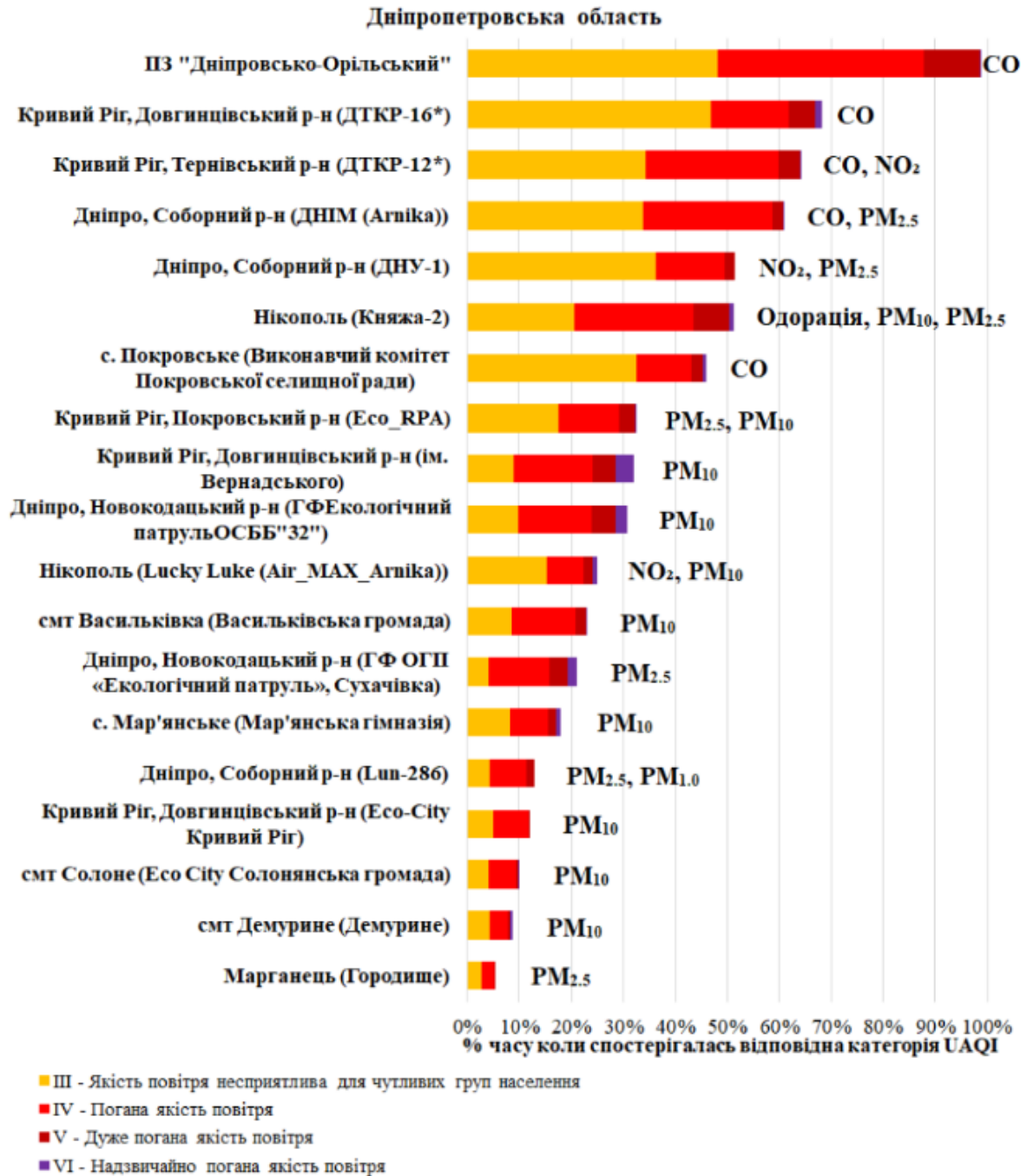
Тематичні карти за бруднення атмосфери.



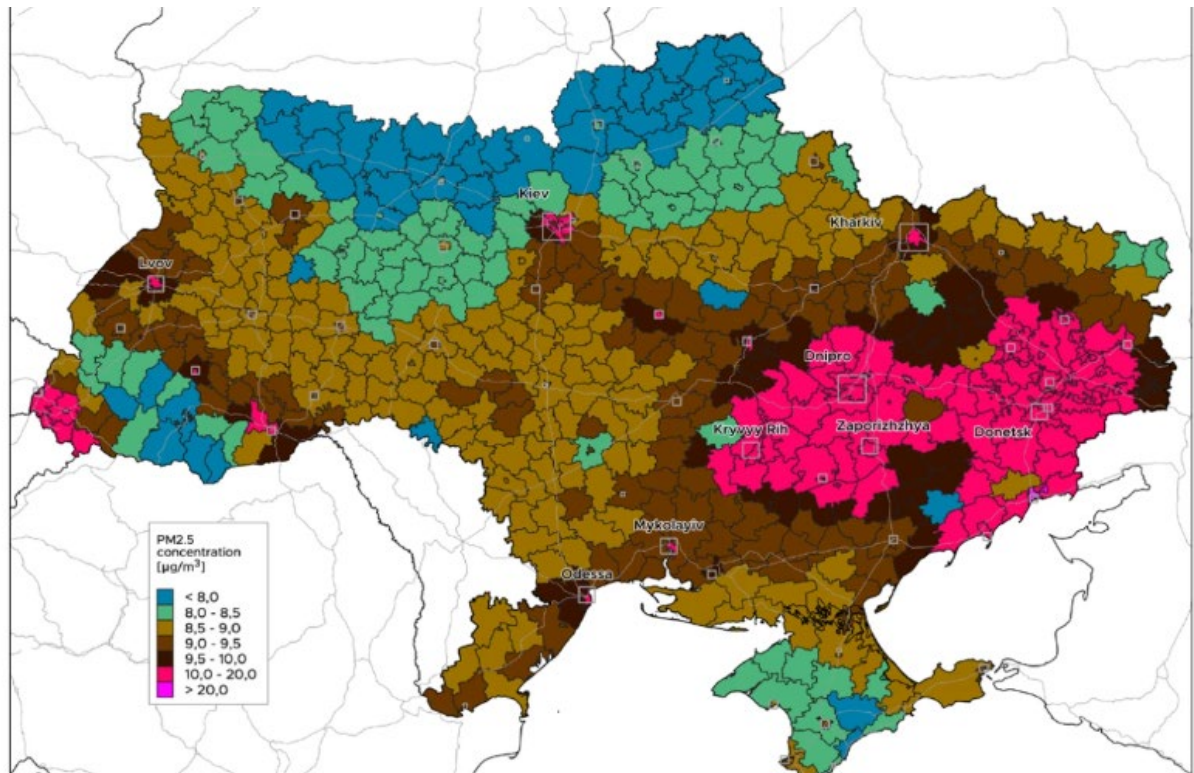
Типова шкала забруднення атмосфери повітря Дніпропетровської області



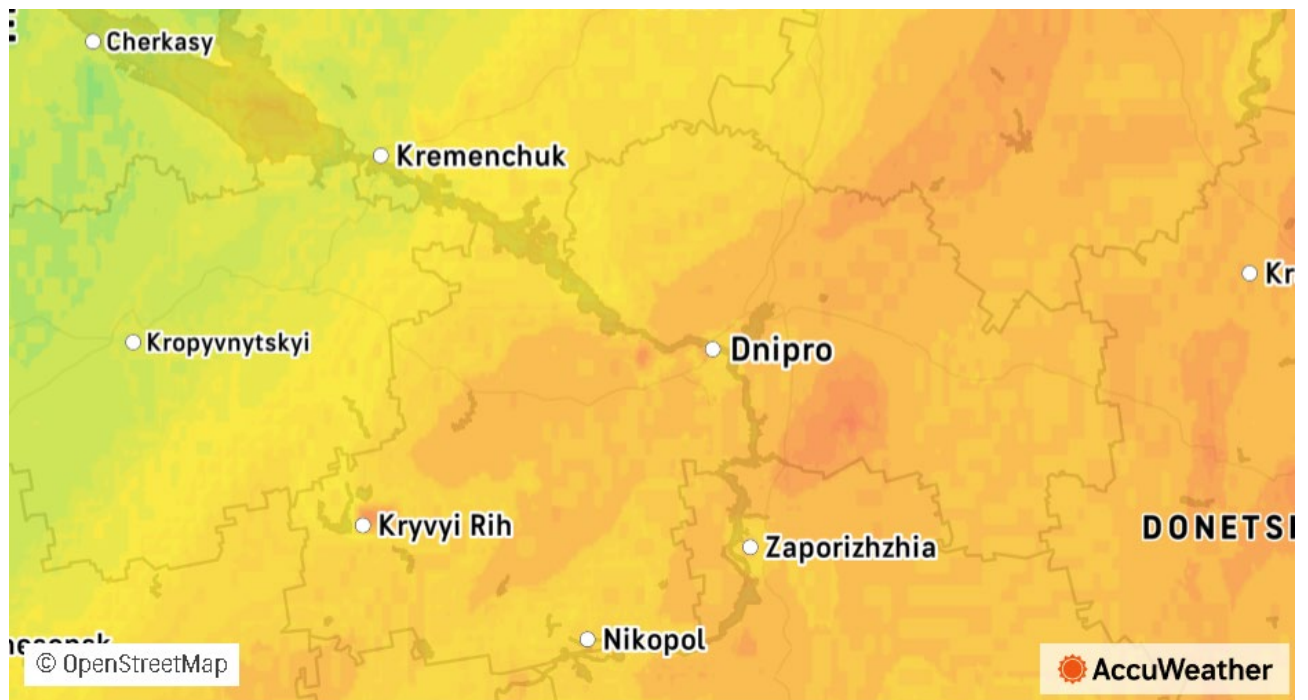
Оцінка стану атмосферного повітря у Дніпропетровській області на 2024 рік



Карта розташування основних промислових підприємств, що здійснюють викиди в атмосферу



Карта поточної якості повітря у Дніпропетровській області



Відмінний



Небезпечний

Таблиці з даними про рівень забруднення повітря

Таблиця Б.1.

Середньорічні концентрації основних забруднювачів у містах
Дніпропетровської області (за останні 5 років)

Місто	PM2.5 (мкг/м ³)	PM10 (мкг/м ³)	NO ₂ (мкг/м ³)	SO ₂ (мкг/м ³)	CO (мг/м ³)
Дніпро	25	40	35	12	0.9
Кривий Ріг	30	50	42	18	1.2
Кам'янське	28	48	38	15	1.1
Нікополь	20	35	29	10	0.8
Павлоград	22	38	31	11	0.7

Таблиця Б.2.

Рівень забруднення повітря за Індексом якості повітря (AQI) у
Дніпропетровській області

Місто	AQI (середнє значення)	Оцінка якості повітря
Дніпро	85	Помірне забруднення
Кривий Ріг	102	Незадовільне
Кам'янське	95	Помірне забруднення
Нікополь	72	Відносно чисте
Павлоград	78	Відносно чисте

Алгоритм створення картографічної моделі забруднення

Кроки створення картографічної моделі у ГІС:

1. Збір вхідних даних

- Дані стаціонарних постів моніторингу
- Супутникові знімки
- Метеорологічні дані
- Статистичні показники забруднення

2. Обробка даних та підготовка шарів ГІС

- Фільтрація та корекція даних
- Використання методів інтерполяції (Крігінг, IDW)
- Нормалізація даних для картографічного представлення

3. Візуалізація даних

- Створення ізолінійних карт концентрації забруднювачів
- Побудова теплових карт (heatmaps)
- Аналіз тенденцій у забрудненні

4. Прогнозування змін у якості повітря

- Використання математичних моделей
- Врахування сезонних коливань та метеофакторів
- Розробка сценаріїв екологічного розвитку