

УДК: 912.43

В.В. ПУТРЕНКО, С.Ю. НАЗАРЕНКО

**ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ**

***Анотація.** Запропоновано наукові та практичні засади моніторингу стану атмосферного повітря на основі використання даних супутникової зйомки Землі з метою дослідження вмісту часток $PM_{2,5}$ та окису азоту NO_2 . На основі регресійного та географічно зваженого регресійного аналізу встановлено зв'язок між даними космічного моніторингу та наземних спостережень.*

***Ключові слова:** моніторинг, забруднення атмосфери, дані дистанційного зондування Землі, регресійний аналіз.*

Вступ

Проблеми забруднення повітря є важливими та актуальними для підтримки сталого розвитку та чистого навколишнього середовища. Для України проблеми оцінювання якості повітря є особливо актуальними у зв'язку з великою кількістю викидів із стаціонарних та нестаціонарних джерел забруднення та низьким рівнем розвитку системи спостережень. Тому використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) надає переваги для здійснення моніторингу стану повітря по всій території країни за рахунок широкого територіального охопту та низької вартості, але для використання даних ДЗЗ необхідно проведення комплексу робіт з верифікації та порівняння з наземними інструментальними вимірюваннями.

Останніми роками атмосферні моделі, засновані на ГІС, все частіше використовуються для аналізу навколишнього середовища і пов'язаної з ним підтримки управлінських рішень для осіб, що працюють у сфері екології. Наприклад, в нашій державі було розроблено декілька спеціалізованих інформаційно-аналітичних систем оцінки стану екологічної безпеки при забрудненнях атмосферного повітря. Основними з них є: геоінформаційна аналітична система візуалізації медико-екологічного моніторингу України ГІАСВ МЕМУ; автономна моделююча система для завдань моніторингу техногенних навантажень на атмосферу від небезпечних підприємств MathMapMod, яка в подальшому увійшла до складу спеціалізованої інформаційно-аналітичної системи еколого-енергетичного моніторингу AISEEM [1–4].

В останній час все більшу увагу привертають публікації, пов'язані з використанням даних ДЗЗ для моніторингу та оцінювання стану атмосферного повітря, зокрема методики обробки даних із метеорологічних супутників [5–6]. У тому числі, значна кількість досліджень присвячена впливу $PM_{2,5}$ та NO_2 на якість атмосферного повітря [7–9] та оцінці викидів від антропогенних джерел з використанням даних ДЗЗ [10–11]. В Україні використання даних ДЗЗ у поєднанні із наземними спостереженнями для отримання інтегральних полів якості повітря тільки починає свій розвиток.

Метою роботи є дослідження даних ДЗЗ для цілей моніторингу стану повітря на території України.

Завданнями є вивчення літературних джерел з питань ДЗЗ, придатності сучасних супутникових систем та їх продуктів для аналізу стану повітря, встановлення математичних залежностей між супутниковими даними та результатами наземних спостережень, виявлення особливостей розподілу забруднення атмосферного повітря в Україні.

1. Виклад основних результатів

Для проведення дослідження використовуються дані з геопорталу проекту Atmospheric Composition Analysis Group за адресою <http://fizz.phys.dal.ca/>. В якості базових даних було обрано дослідження за допомогою ДЗЗ вмісту часток $PM_{2.5}$ та окису азоту NO_2 як одних із базових видів забруднення атмосферного повітря.

Частки $PM_{2.5}$ мають розміри менше 10 мкм. Виділяють два основних типи часток: вони можуть бути вуглецевісткі і металеві, які у свою чергу можуть бути розділені на підрозділи на підставі своїх магнітних властивостей. У $PM_{2.5}$, які часто називають дрібнодисперсними зваженими частинками, також входять ультрадрібнодисперсні частинки діаметром менше 0,1 мкм. На більшості території Європи $PM_{2.5}$ складають 50-70% PM_{10} . Електронна мікроскопія і спеціальні лабораторні умови дозволяють вченим спостерігати морфологію. У повітрі вміст часток може бути вимірний за допомогою конденсаційного лічильника часток, в якому частинки змішуються з парами спирту і потім остигають, при цьому пар конденсується на частинках і потім їх можна порахувати за допомогою світлового сканера. Частки можуть бути антропогенного або природного походження. Через велику кількість і можливість проникати глибоко в легені $PM_{2.5}$ мають великий вплив на здоров'я дихальної системи.

В Україні в діючій системі спостереження за станом атмосферного повітря контроль за вмістом $PM_{2.5}$ не здійснюється, що дає можливість для використання даних ДЗЗ для моніторингу та прогнозування впливу на здоров'я населення.

Серед усіх оксидів азоту в атмосферу викидається в основному двоокис азоту NO_2 – безбарвний отруйний газ, що не має запаху, подразнює діє на органи дихання. Двоокис азоту (NO_2) утворюється в навколишньому повітрі в результаті окислення оксиду азоту (NO), який у свою чергу з'являється в атмосфері природним шляхом і в результаті людської діяльності, оксиди азоту формуються в основному за рахунок спалювання викопного палива. Це відбувається в результаті хімічної реакції між атмосферним N_2 і O_2 в присутності тепла з утворенням NO , який потім знову вступає в реакцію з O_2 з утворенням NO_2 . Швидкість реакції визначається температурою згоряння. Таким чином, на відміну від SO_2 , NO_2 не є компонентом викопного палива, а результатом каталітичної реакції тепла з атмосферним N_2 і O_2 в процесі згоряння [9].

Особливо небезпечні оксиди азоту в містах, де вони взаємодіють з вуглецями вихлопних газів, де утворюють фотохімічний туман – смог [3]. Діоксид азоту (NO_2) відіграє важливу роль у формуванні тропосферного озону і є шкідливим для здоров'я людини і екосистеми. Тож NO_2 виділяється

в тропосферу в результаті антропогенних (наприклад: використання викопного палива, спалювання біопалива, спалювання біомаси) і природних (наприклад: лісові пожежі і блискавки) явищ [11].

Ми використовували спостереження забруднення NO_2 з глобального експерименту зі спостереження озону (GOME) супутниковими приладами SCIAMACHY і GOME-2 [8]. Розрахунок концентрації діоксиду приземного азоту (NO_2) відбувається шляхом застосування локальних коефіцієнтів масштабування з глобальної тривимірної моделі (GEOS-Chem) до розподілу тропосферного NO_2 , що отриманий з моніторингу озонового шару інструментом (OMI) на борту супутника Aura.

Наземні дані $\text{PM}_{2.5}$ були обраховані на основі супутникових джерел шляхом застосування географічно зваженої регресії (GWR) для глобальних оцінок на основі геофізичних вимірів (рис. 1). Дані по $\text{PM}_{2.5}$ були отримані з продуктів декількох супутників (Micp, MODIS Dark Target, MODIS і SeaWiFS Deep Blue, і MODIS MAIAC) і поєднувалися з моделюванням (GEOS-Chem) на основі їх відносної невизначеності з використанням наземного сонячного фотометра (AERONET) [<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>].

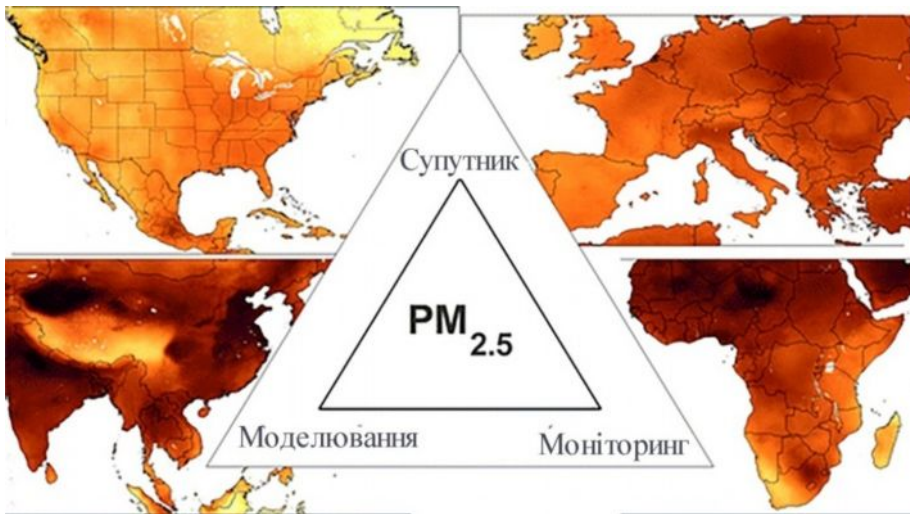


Рисунок 1 – Загальна модель обробки даних $\text{PM}_{2.5}$

Глобальні набори даних $\text{PM}_{2.5}$ представлені в сумісному форматі з ArcGIS NetCDF [.NC] або ASCII [.asc.zip] в архівованих файлах. Файли з прив'язкою до сітки координат використовують проекцію WGS84. Сітка $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ містить 12 500 координат широти з центрами від 54.995° до 69.995° Пн. ш. і 36 000 значень довготи з центрами від 179.995° Зх. д. до 179.995° Сх. д. Файли для перегляду в Google Earth також надаються [.kmz].

Після скачування даних ДЗЗ по $\text{PM}_{2.5}$ та NO_2 нами був взятий індекс забруднення атмосфери (ІЗА) із сайту Українського гідрометеорологічного центру. Цей показник використовують на території України і країн колишнього СРСР для визначення стану забруднення повітря. При розрахунку ІЗА враховуються не тільки концентрації різних речовин, але і їх вплив на здоров'я людини.

Даний індекс розраховується по окремих забруднюючих речовинах для оцінки внеску окремих домішок в загальний рівень забруднення атмосфери або комплексно за декількома речовинами для порівняння ступеня забруднення атмосфери в різних містах. Комплексний ІЗА, що враховує L речовин, присутніх в атмосфері, розраховується за формулою:

$$I_n = \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n (x_i / ПДК_i) C_i \quad (1)$$

де:

X_i – середня за рік концентрація i -тої речовини,

C_i – коефіцієнт, що дозволяє привести ступінь забруднення повітря i -тою речовиною до ступеня забруднення повітря діоксидом сірки,

I_n – ІЗА, безрозмірна величина.

Значення C_i визначається для речовин в залежності від їх класу небезпеки.

Діоксид азоту відноситься за ступенем шкідливості до другого класу небезпеки ($C_i = 1$). C_i для речовин 4, 3, 2 і 1 класів небезпеки дорівнює 0,85, 1,0, 1,3 і 1,5 відповідно.

При розрахунку ІЗА передбачається, що всі забруднюючі речовини, які не перевищують гранично допустимі концентрації, однаково впливають на організм людини, але із збільшенням їх концентрацій збільшується і ступінь їх шкідливості, що зростає з різною швидкістю, яка залежить від класу небезпеки речовини.

Сумарний ІЗА використовується для порівняння ступеня забруднення атмосфери в різних містах, проте це можливо лише в разі, якщо вимірюються концентрації однакового набору речовин. Як показує практика, набір вимірюваних забруднюючих речовин в різних містах, більш того, на різних постах одного міста, може відрізнятись. У такому випадку розраховується ІЗА для кожної речовини, а потім складається регресійний варіаційний ряд отриманих величин. Вибираються речовини з найбільшими значеннями індексів (зазвичай 5), по яких і проводиться розрахунок, а за тим і порівняння сумарного індексу забруднення атмосфери.

За значенням ІЗА можна судити про ступінь забруднення атмосферного повітря, динаміку забруднення, а також про необхідні управлінські рішення у сфері природокористування.

У зв'язку з цим актуальним завданням є встановлення математичних залежностей між ІЗА та наявними даними ДЗЗ, для того щоб мати можливість зіставних оцінок на всій території країни з даними ІЗА.

Загальна методика обробки відображена на рис. 2.

В якості вхідних даних в моделі використовувалися розрахункові глобальні показники $PM_{2.5}$ та NO_2 за період 1996-2014 рр., що були представлені як середньорічними, так і усередненими за період часу даними. Також в ході дослідження використовувалися дані розрахунку ІЗА та його складових за період з 1992 до 2013 р., що були надані Центральною геофізичною обсерваторією для 53 населених пунктів України. В якості базового програмного забезпечення використовувалося програмне забезпечення ArcGIS.



Рисунок 2 – Схема методики обробки даних

Первинні обрахунки були виконані для зіставлення річних та кумулятивних значень забруднення та ІЗА. На жаль, жодний із варіантів не зміг встановити істотний зв'язок між цими показниками. Тому в подальшій роботі було вирішено працювати зі складовими ІЗА, зокрема вимірами NO_2 в складі ІЗА населених пунктів.

У результаті цих вимірів було встановлено наявність істотного зв'язку між даними супутникового моніторингу та вимірними значеннями NO_2 з використанням інструментальної зйомки. Це вказує на результативність використання супутникових даних для оцінки забруднення атмосферного повітря на всій території країни. При цьому значення зв'язку збільшуються у напрямі збільшення абсолютних значень показника. У цьому випадку коефіцієнт кореляції становить 0,8183 і є істотним. Подальшим кроком стало

дослідження характеру зв'язку між даними. Для цього було побудовано розподіл населених пунктів у двовимірному просторі варіограми, де по осі X відкладено значення наземних спостережень, а по осі Y – супутникові дані (рис. 3).

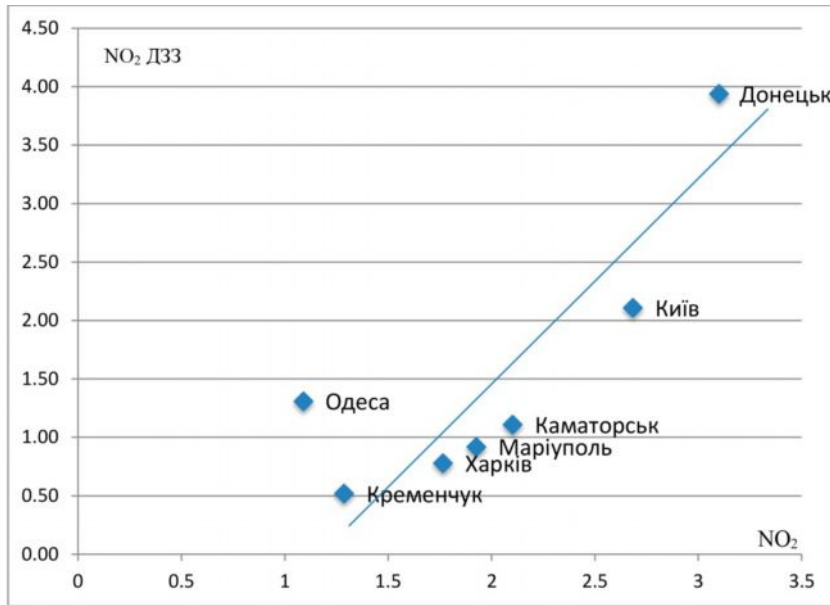


Рисунок 3 – Зв'язок між даними наземних спостережень та дистанційного зондування вмісту NO₂

На основі даного зв'язку було розраховано рівняння лінійної регресії для переходу від даних наземних спостережень до результатів космічного знімання:

$$NO_{2e} = 1,23278021 + 0,498128761 * NO_2, \quad (2)$$

де:

NO_{2e} – розраховане значення двоокису азоту,

NO₂ – первинні супутникові дані виміру двоокису азоту.

Значення R² = 0,8183, що підтверджує надійність моделі.

Це регресійне рівняння допомагає отримати кореговані значення NO₂ для всієї території. Практична реалізація перерахунку здійснювалась за допомогою інструменту Калькулятор растрів, який входить до складу модулю Spatial Analyst. Калькулятор растрів дозволяє працювати одночасно з усім масивом комірок растру, здійснюючи будь-які математичні операції. Результат обрахунку показано на рис. 4.

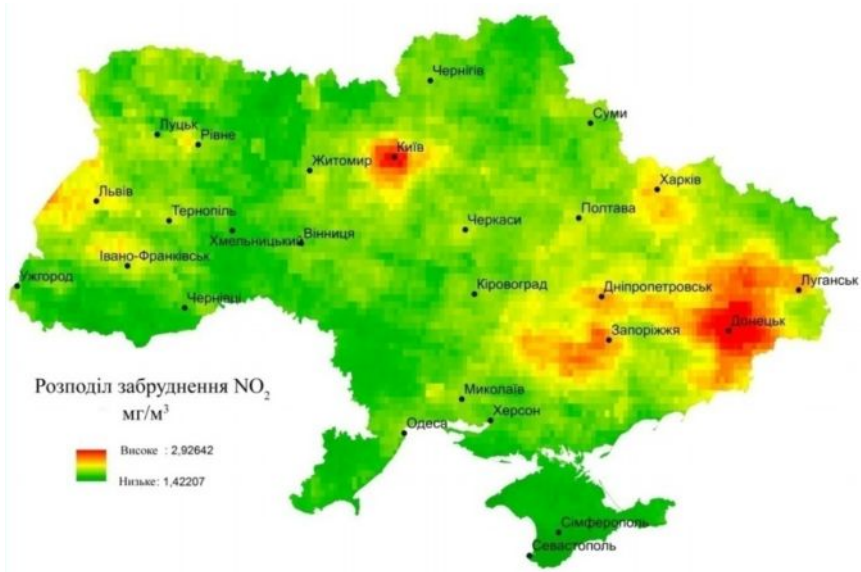


Рисунок 4 – Кореговані за інструментальними дослідженнями виміри забруднення NO₂

Карта значень NO₂ показує найбільші значення у східній частині України, що характерно для промислово-розвинутих районів країни. Також чітко виділяється Придніпровський басейн з Дніпром, Запоріжжям, Кривим Рогом. Значним осередком викидів NO₂ є Київська агломерація із Києвом, яка впливає на відстані до 100 км на якість повітря навколишніх населених пунктів. Також значними центрами залишаються Харків, Івано-Франківськ, Львів. В останньому випадку також має вплив транскордонний перенос.

Наступним кроком дослідження стало встановлення зв'язку між окремими показниками та інтегральним значення ІЗА. Для цього було побудовано варіограму розподілу між корегованими значеннями NO₂ та ІЗА (рис. 5).

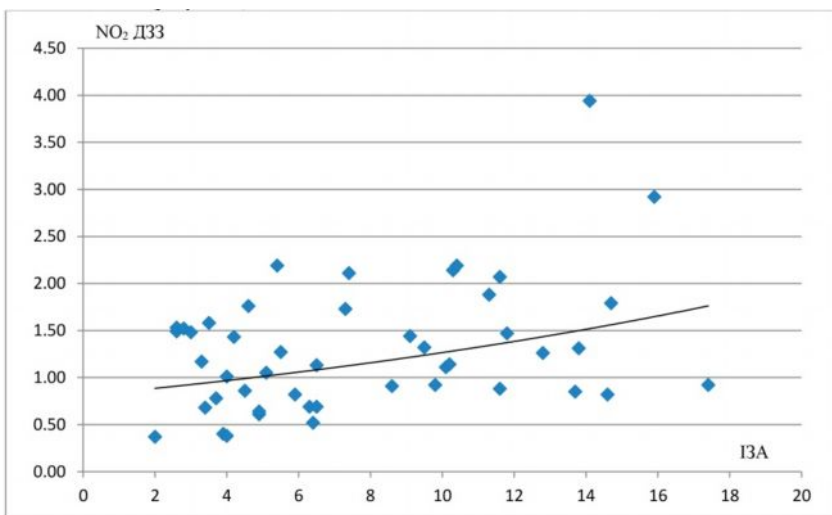


Рисунок 5 – Зв'язок між даними ІЗА та забрудненням NO₂ в досліджуваних точках

У результаті аналізу варіограми було запропоновано використання експоненціальної моделі регресії за наступною формулою:

$$IZAe = 4,5464 * Exp(0,2937 * NO_{2e}), \quad (3)$$

де

$IZAe$ – розрахункове значення індексу забрудненості атмосфери;

NO_{2e} – розрахункове значення двоокису азоту, що було отримано в результаті трансформації первинних супутникових даних.

Значення $R^2 = 0,6342$, що підтверджує значимість моделі.

Застосування експоненціальної моделі сприяє більш швидкому зростанню значень ІЗА при відносно низьких темпах зростання NO_2 . В цілому такий характер розподілу відповідає погіршенню якості повітря у великих містах (рис. 6).

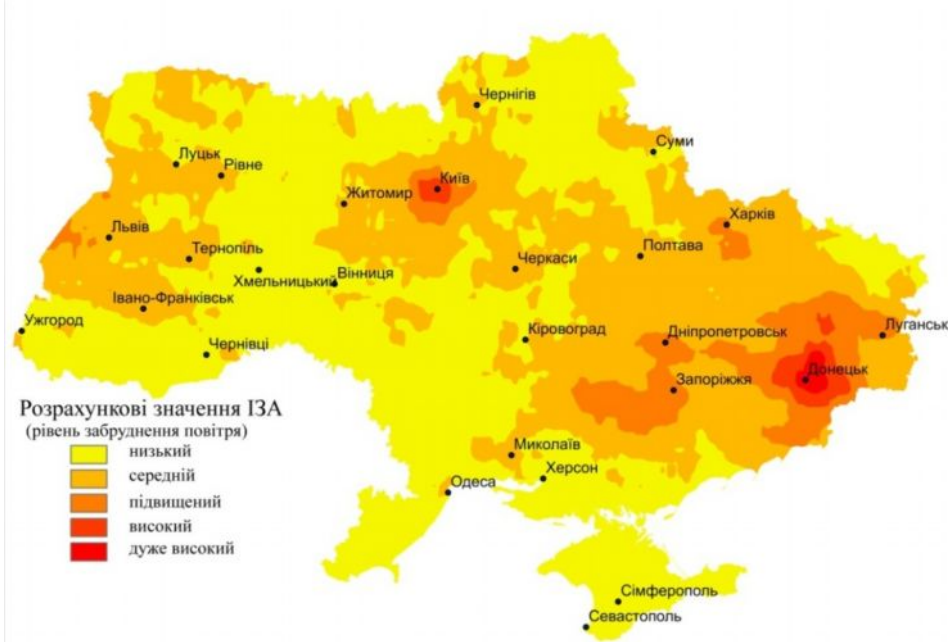


Рисунок 6 – Виміри ІЗА на основі супутникових даних

Проаналізувавши дані ІЗА та отриману карту, можемо побачити 10 найбільш забруднених міст України (табл. 1).

Таблиця 1 – Десять найбільш забруднених обласних центрів України за супутниковими вимірами ІЗА

Ранг	Місто	Розрахунок ІЗА
1	Донецьк	10,33170223
2	Київ	9,763614655
3	Дніпро	8,770153999
4	Запоріжжя	8,763560295
5	Луганськ	8,712148666
6	Харків	8,487448692

Продовження табл. 1

Ранг	Місто	Розрахунок ІЗА
7	Львів	8,341424942
8	Черкаси	7,965660572
9	Тернопіль	7,962526321
10	Полтава	7,932358742

Наступним кроком нашої роботи було визначення просторових зв'язків між показниками NO_2 та $PM_{2.5}$. Це було зроблено з метою аналізу взаємозв'язку інтегральних оцінок стану атмосфери, таких як ІЗА та такого важливого показника, як вміст $PM_{2.5}$. На рис. 7 видно, що найбільша концентрація часток $PM_{2.5}$ спостерігається в Західній Україні до 26 мкг/м^3 та пов'язана із західним переносом в Україну повітряних мас та транскордонним переміщенням. Загальна амплітуда значень в Україні змінюється від 13 до 26 мкг/м^3 , що свідчить про зміну показника вдвічі. Інші значні центри викидів також мають підвищені значення, але не настільки. Серед них значно виділяється лише Київська агломерація.

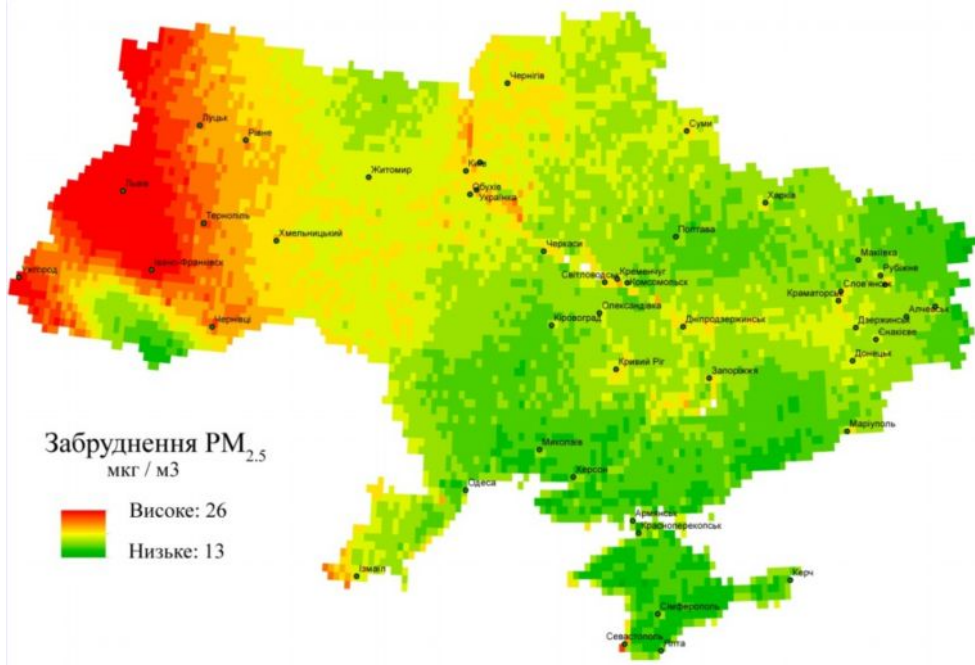


Рисунок 7 – Розподіл середньорічних значень $PM_{2.5}$ на території України у 2012 р.

У цьому випадку для встановлення зв'язків використовувались глобальні та локальні методи, що передбачають наявність просторової диференціації коефіцієнтів регресійних рівнянь.

В якості глобального методу було використано лінійне регресійне рівняння, за наступною формулою:

$$PM_{2.5e} = 17,4148 + 0,0023 * NO_2, \quad (4)$$

де:

$PM_{2.5e}$ – розрахункове значення забрудненості атмосфери частинками $PM_{2.5}$;

NO_2 – розрахункове значення двоокису азоту, що було отримано в результаті трансформації первинних супутникових даних.

Рівняння географічно зваженої регресії має вигляд:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) \cdot x_{ik} + \varepsilon_i \quad (5)$$

де:

(u_i, v_i) – місцеположення i -го об'єкта (координати i -ї точки);

y_i – значення результативної ознаки;

x_{ik} – значення k -ї пояснюючої змінної для i -го об'єкта;

$\beta_k(u_i, v_i)$ – невідомі коефіцієнти;

ε_i – регресійні залишки;

$i = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, p$.

Результати розрахунку географічно зваженої регресії для розподілу $PM_{2.5}$ залежно від NO_2 показано на рис. 8.

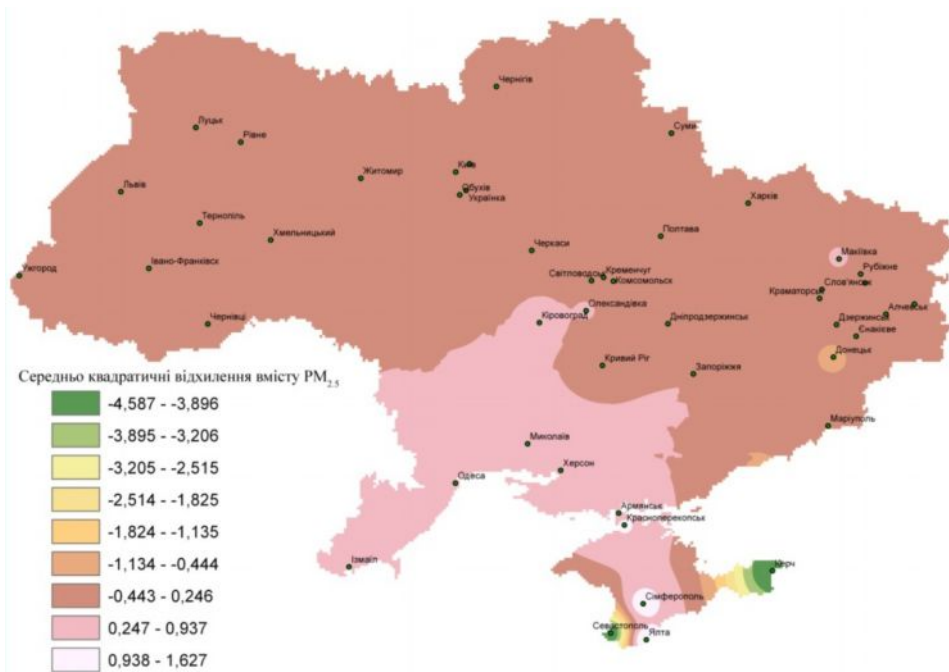


Рисунок 8 – Розподіл середньоквадратичних відхилень для географічно зваженої регресії $PM_{2.5}$

Із цього рисунку можна побачити, що розподіл середньоквадратичних відхилень має два регіони: північний, де значення відхилень знаходяться в

діапазоні від -0,433 до 0,246, та південний, де відповідно діапазон має граничні значення: 0,247–0,937. Таким чином, можна сказати, що переважна частина України потрапляє до діапазону, який зі значним ступенем довіри моделюється глобальним регресійним рівнянням. В той же час чітке виділення двох районів на території країни свідчить про доцільність застосування двох глобальних або поліноміальних регресійних рівнянь, які будуть зменшувати дисперсію у своїх субрегіонах.

Висновки

Отже, у результаті виконаної роботи підтверджено доцільність використання даних ДЗЗ та результатів їх обробки для екологічної оцінки та моніторингу стану повітря. На основі дослідження даних встановлено, що найбільш репрезентативними показниками для оцінки стану повітря є результати вимірювання $PM_{2.5}$ та NO_2 . Встановлено залежність між наземними спостереженнями та результатами обробки космічних даних для виміру NO_2 та характер залежності між NO_2 та ІЗА, на основі регресійних рівнянь, що дає можливість для екстраполяції даних про якість повітря на всю територію України.

На основі використання методів географічно зваженої регресії встановлено тісноту зв'язку між показниками NO_2 та $PM_{2.5}$, що дає можливість визначити з достовірною точністю значення $PM_{2.5}$ в окремих районах України. Разом з тим встановлено, що розподіл забруднення $PM_{2.5}$ значно відрізняється від традиційних видів забруднення, а тому потребує розвитку власної наземної мережі контролю.

Вперше на основі математичної моделі використання супутникових даних розраховано потенційні значення ІЗА для всієї території України.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні списку досліджуваних забруднювачів повітря за допомогою даних ДЗЗ та розрахунку інтегральних моделей оцінки забруднення повітря з використанням ДЗЗ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Іщук О.О. Методологічні особливості використання аналітичних та моделюючих засобів ГІС для прогнозування і оцінки наслідків надзвичайних ситуацій на території України // Уч. зап. Таврич. ун-та. Географія. – 2002. – Т. 15(54). – № 1. – С. 94–101.
2. Ночвай В. Використання ГІС у задачах управління якістю повітря / Ночвай В., Криваковська Р., Іщук О. // Електроніка та інформаційні технології. 2012. Випуск 2. С. 154–163.
3. Посудін Ю. І. Моніторинг довкілля з основами метрології: підручник – К.: 2012. – 426 с.
4. Попов О.О. Математичне та комп'ютерне моделювання техногенних навантажень на атмосферу міста від стаціонарних точкових джерел забруднення: Автореф. дис... канд. техн. наук. – К., 2010. – 20 с.
5. Яцишин А.В. Використання інформаційних технологій в задачах управління екологічною безпекою / Яцишин А.В., Попов О.О., Артемчук В.О. – Праці Одеського політехнічного університету, 2013. Вип. 2(41) – С. 289–294.
6. Aaron van Donkelaar Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors /

Aaron van Donkelaar, Randall V. Martin, Michael Brauer, N. Christina Hsu, Ralph A. Kahn, Robert C. Levy, Alexei Lyapustin, Andrew M. Sayer, and David M. Winker – [Електронний ресурс] – <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5b05833>

7. Halek F. Gis assessment of the PM10, PM2.5 and PM1.0 concentrations in urban area of Tehran in warm and cold seasons / F. Halek, A. Kavousi-rahima - The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, volume XL-2/W3, 2014 – pp. 141–149.

8. Jeffrey A. Geddes Long-term trends worldwide in ambient NO2 concentrations inferred from satellite observations / Jeffrey A. Geddes, Randall V. Martin, Brian L. Boys and Aaron van Donkelaar - Environmental Health Perspectives – vol. 124 – № 3 – March 2016 – pp. 281–289.

9. Khaled Ahmad Ali Abdulla Al Koas GIS-based mapping and statistical analysis of air pollution and mortality in Brisbane, Australia / Khaled Ahmad Ali Abdulla Al Koas - the Queensland University of Technology – April 2010 – 67 p.

10. Paul Monks Fine particulate matter (PM2.5) in the United Kingdom / Paul Monks - Prepared for: Department for Environment, Food and Rural Affairs - Crown copyright. – 2012 – 202 p.

11. Richa Rai Gaseous air pollutants: a review on current and future trends of emissions and impact on agriculture / Richa Rai, Madhu Rajput, Madhoolika Agrawal and S.B. Agrawal - Journal of Scientific Research - BanarasHinduUniversity, Varanasi – pp. 77–102.

12. Wang S.W. Growth in NOx emissions from power plants in China: bottom-up estimates and satellite observations / S.W. Wang, Q. Zhang, D. G. Streets, K. B. He, R. V. Martin, L. N. Lamsal, D. Chen, Y. Lei, and Z. Lu – Published in Atmos. Chem. Phys. Discuss.: 2 January 2012 – pp. 4429–4447.

Стаття надійшла до редакції 04.11.16.