

МЕТОД ПРОСТОРОВО-ХРОНОЛОГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АРЕАЛІВ АМБРОЗІЇ ЗА ДАНИМИ ОДНОГО ПОСТУ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ СИСТЕМИ АЕРОБІОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

¹Вінницький національний технічний університет;

²Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова

Розроблено новий метод просторово-хронологічного оцінювання можливих місць розташування та інтенсивності продукування пилку ареалами амброзії за даними лише одного посту Європейської системи аеробіологічного моніторингу за умов невизначеності та мінімальної кількості даних з використанням сплайн-апроксимації типових моделей продукування пилку та низки підходів до усунення невизначеності різних параметрів процесу. Працездатність методу підтверджена на реальних даних — підтверджені відомі та виявлені нові можливі ареали.

Ключові слова: пилок амброзії полинолістої, сплайн-інтерполяція, просторово-хронологічна модель, Європейська система аеробіологічного моніторингу, невизначеність задачі.

Вступ

В сучасному світі актуальною є проблема впливу пилку амброзії на здоров'я населення. На алергію, що спричинена пилом амброзії, хворіє більше, ніж 70 млн. осіб в усьому світі. Таку статистику надає Всесвітня організація охорони здоров'я.

Пилок цієї рослини викликає алергічні захворювання у людей, тому амброзія, яка росте біля населених пунктів, є небезпечним фактором, що шкодить здоров'ю людини. Період цвітіння амброзії в Європі триває з липня по жовтень, і саме тоді пилок рослини має надзвичайно високий алергенний вплив на організм людини. Відомо, що під час цвітіння квітка амброзії генерує в атмосфері мільярди зерен пилку, що переноситься вітром на великі відстані [1].

Тому виникла велика необхідність прогнозування поширення карантинної рослини — амброзії полинолістої — в Європі і безпосередньо у різних регіонах України.

З цією метою в Європі створена Європейська система аеробіологічного моніторингу (ЄАМ). До цієї системи входить 38 європейських країн (в т.ч. і Україна), в яких розташовано понад 6000 пунктів спостереження за пилом [2]. Для опрацювання, збереження інформації про пилок та прогнозування його поширення по території Європи у Фінському метеорологічному інституті (м. Хельсінкі) розроблена система інтегрованого моделювання атмосферного складу SILAM («System for Integrated modelling of Atmospheric composition»).

Для застосування моделі SILAM необхідно багато даних з великої кількості постів спостережень за пилом (зі щогодинними даними) та метеоданих по атмосфері на різній висоті. Розробники цієї моделі відзначають, що на територію України ця модель не забезпечує достовірні розрахунки, через малу кількість постів спостережень ЄАМ [2], [3]. Особливо актуальною проблема моделювання є у м. Вінниці, пост в якому є одним з найближчих до країн ЄС серед вітчизняних постів, але найближчий до нього знаходиться у Києві за 280 км. Дані цього посту доступні тільки через двогодинний інтервал [1], [4]. Найближчий метеопост знаходиться на відстані, більше 11 км в аеропорту, розташованому під м. Вінниця. Все це вносить суттєву невизначеність в задачу і унеможливує використання точних математичних моделей та потребує розроблення нових моделей і методів за даними лише одного поста системи ЄАМ.

Головною проблемою моделювання поширення пилку за даними одного поста є те, що ці дані сильно залежать від напрямку вітру. Якщо зранку вітер дув з півночі, а вдень — зі сходу, то це є

пилкок з різних ареалів, тобто це будуть вибірки різних стохастичних процесів. Пилкок переноситься від ареалів, розташованих на різній відстані та з різними параметрами (розміри, середня інтенсивність продукування пилку). В Європі цей пилкок уловлюється різними сусідніми постами системи ЄАМ і це дозволяє правильно моделювати його поширення. Якщо ж йдеться про використання лише одного поста системи ЄАМ, то єдиним виходом для надійного прогнозування пилку є такий: спочатку використати наявні дані для оцінювання параметрів усіх основних ареалів пилку, в першу чергу, їх місць розташування та розмірів, потім, хоча б за декількома спостереженнями пилку з кожного напрямку, де розташовані ті ареали, уточнити інтенсивність продукування пилку цими ареалами (інтенсивність щороку зазнає змін через період, коли почалось весінне потепління, яка тривалий час була температура, вологість тощо), а тоді, знаючи прогноз метеопараметрів на певну дату, робити прогноз вмісту у повітрі пилку, який буде надходити з ареалів, розташованих у тому ж напрямку, звідки дує вітер. Найскладнішим у цій задачі є процес оцінювання параметрів ареалів пилку за дуже малою кількістю даних з лише одного поста спостережень за пилком, які залежать від метеоданих, що теж визначені дещо наближено, через значну віддаленість метеопоста від того поста ЄАМ.

Отже, актуальним є розроблення методу просторово-хронологічного оцінювання параметрів ареалів амброзії за даними лише одного посту Європейської системи аеробіологічного моніторингу за умов невизначеності та мінімальної кількості даних.

Формалізація та постановка задачі дослідження

Проблемою моделювання процесу продукування та розповсюдження пилку амброзії займаються багато науковців в усьому світі [1]—[5]. У роботі [3, рис. 5] автори консолідували низку експериментальних даних про кількість пилку амброзії полинолістої, які залежать від вологості повітря. Ця інформація притаманна ряду широт Європи і її можна використовувати як типові криві і для поста у м. Вінниці. Підрахунок експериментальних даних роботи [3] здійснювався кожену годину, а на постах ЄАМ в Україні, наприклад у м. Вінниці, як було зазначено вище, кількість пилку аналізується за кожні 2 години. Для того, щоб забезпечити можливість використати цю інформацію

для м. Вінниці, дані графіка [3, рис. 5] перераховані на двогодинний інтервал (рис. 1).

Щоби використовувати криві з рис. 1 для моделювання, треба їх апроксимувати. Спроби авторів підібрати відомі криві за такою малою кількістю ненульових значень (від 3 до 5), які дозволили б достатньо точно апроксимувати дані графіка на рис. 1 з урахуванням необхідної монотонності, були марні. Функція Гауса, квазідзвінищева функція, логістичні, тригонометричні та інші відомі функції не забезпечують прийнятну похибку, а поліноміальна регресія дозволяє досить точно апроксимувати ці точки, але між ними дає

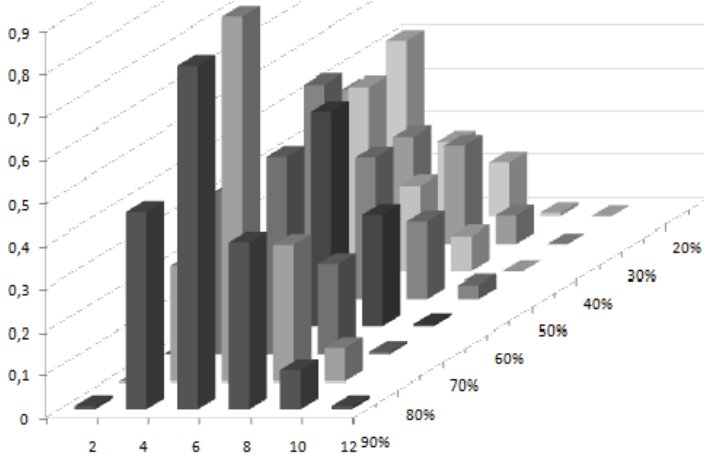


Рис. 1. Типові криві кількості пилку амброзії полинолістої в повітрі P зі значеннями через 2 години, в залежності від різних значень вологості RH від 20 % до 90 %

явно некоректні коливальні ділянки. Тому пропонується апроксимувати ці криві сплайнами першого (кусково-лінійна апроксимація) або другого (параболами) порядку [6]. Такий підхід дає переваги в тому, що перший вид сплайнів дозволяє здійснити припасовування типової кривої до експериментальної вже по двох точках, а третій — вимагає мінімум 3 точки, однак, забезпечує більшу достовірність апроксимації. Для апроксимування кривих для кожної вологості на рис. 1 достатньо використати N_1 сплайнів першого або N_2 сплайнів другого порядку, що опише усі 6 точок та 5 перших точок, відповідно. Щодо шостої точки, яку не опише параболічний сплайн, зазначимо, що вона в усіх кривих на рис. 1 практично дорівнює нулю, а отже, її ігнорування неприпустиме.

Для формалізації задачі пропонуємо використовувати систему координат, подану на рис. 2. З одного боку, вхідні дані варто аналізувати в полярній системі координат, враховуючи тільки кут напрямку вітру та відстань, на яку у цьому напрямку переноситься пилкок до поста ЄАМ, що дозволяє формалізувати ареали пилку амброзії у вигляді еліпсів, розташованих у певних секторах,

звідки дме вітер, на певній відстані від поста ЄАМ. А з іншого боку, для відображення результатів моделювання на екрані комп'ютера слід перевести знайдені параметри цих еліпсів у декартову систему координат (див. рис. 2).

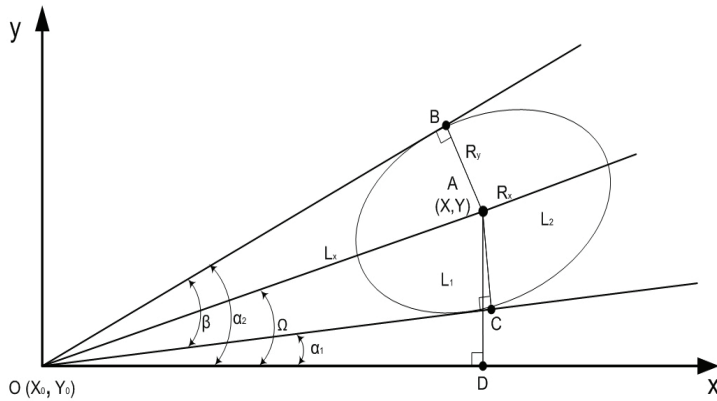


Рис. 2. Система координат та формалізація у ній просторових параметрів ареалу пилку

На рис. 2 використані, також, такі позначення: (X_0, Y_0) — координати місця розташування пристрою «Буркард» для спостереження за пилком (на графіку буде позначатись червоним колом малого радіусу); α_1 та α_2 — кути, які обмежують сектор напрямків вітру, що аналізується; $\beta = |\alpha_2 - \alpha_1|$ — кут сектора.

Отже, уточнена задача, яку необхідно розв'язати, формулюється таким чином: розробити метод просторово-хронологічного оцінювання параметрів $(X, Y, R_x, R_y, \Omega, S, I)$ ареалів амброзії за даними лише одного посту ЄАМ за умов невизначеності та мінімальної кількості даних.

Розв'язання поставленої задачі

Розв'язання поставленої задачі пропонується здійснювати у такі етапи:

Етап 1. Підготовчий етап. Апроксимування типових кривих з рис. 1.

Здійснюємо сплайн-апроксимацію кривих з рис. 1 сплайнами першого $y_1(x)$ і другого $y_2(x)$ порядків:

$$y_1(x) = k \cdot x + b; \tag{1}$$

$$y_2(x) = a_2 \cdot x^2 + k_2 \cdot x + b_2. \tag{2}$$

Важливо відмітити, що не має необхідності в обчисленні та припасовуванні параметрів b у рівнянні прямої (1) та b_2 у рівнянні (2), оскільки головне, щоб ділянки між точками експериментальної кривої мали той самий нахил, що й ділянки на рис. 1.

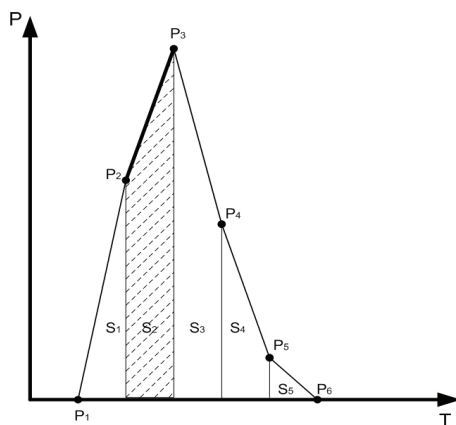


Рис. 3. Відображення процесу визначення достовірності, яку забезпечує другий сплайн першого порядку, коли експериментальна крива припасовується до нього в межах заданої похибки

Вільна ж складова може і, як правило, буде відрізнятись, а тоді за зсувом типової кривої уздовж осі абсцис пропонуємо визначати відстань до ареалу, оскільки саме більша відстань дає більше запізнення надходження пилку до посту ЄАМ, а за зсувом по осі ординат — визначати інтенсивність ареалу, оскільки саме більша інтенсивність дає більші значення вмісту пилку у повітрі.

Очевидно, що такий підхід, особливо з використанням сплайнів першого порядку і припасовуванням по одній тільки парі точок може давати багато хибних збігів. Тому потрібний критерій відбору найдостовірніших варіантів можливого розташування ареалів пилку. Для цього пропонується використати кількість та значущість кривих з рис. 1, які збігаються з експериментальними даними. Тоді, поперше, визначаємо внесок кожної кривої з рис. 1, описаної відповідним сплайном, в охоплення усієї площі під кривою (рис. 3).

Наприклад, для сплайну типу $y_1(x)$ внесок i -ї прямої, що з'єднує точки з координатами (x_i, a_i) та

(x_{i-1}, a_{i-1}) ($i = 2, 3, \dots, N_1 = 5$), дорівнює

$$w_i = \frac{\int_{a_{i-1}}^{a_i} (kx + b) dx}{\sum_{i=1}^5 \int_{a_{i-1}}^{a_i} (kx + b) dx}; \quad (3)$$

$$\int_{a_{i-1}}^{a_i} (kx + b) = \frac{(a_1 - a_2)(2b + a_1k + a_2k)}{2}. \quad (4)$$

Аналогічно визначаються внески двох послідовно з'єднаних параболічних сплайнів. У табл. 1 показано обчислені за формулою (3) ваги для усіх кривих з рис. 1.

Таблиця 1

Ваги сплайнів першого порядку в описі типових кривих з рис. 1.

RH, %	90	80	70	60	50	40	30	20
1	0,13	0,09	0,18	0,07	0,24	0,34	0,42	0,56
2	0,36	0,37	0,40	0,35	0,36	0,42	0,33	0,30
3	0,34	0,38	0,32	0,42	0,22	0,19	0,20	0,13
4	0,14	0,13	0,10	0,15	0,13	0,05	0,05	0,01
5	0,03	0,03	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00

По-друге, під час апроксимування наборів експериментальних даних у кожному секторі за одну добу аналізується скільки M сплайнів вдається припасувати до цих наборів, а тоді пропонується достовірність D опису обчислювати як суму ваг відповідних припасованих сплайнів

$$D = \sum_{j=1}^M w_j. \quad (5)$$

Чим більша кількість сплайнів припасована, тим достовірнішою є апроксимація. Якщо усі сплайни припасувались нормально, тоді $D = 1$.

Аналіз пропонується робити таким чином:

1. В циклі перебирати усі можливі набори послідовно розташованих експериментальних точок з кожного сектора за кожен добу, до яких можна припасувати кожний з видів сплайнів шляхом варіювання можливого зсуву (запізнення) τ , тобто часу, за який пилок прилітає з віддалених ареалів і починає фіксуватись, до кривої з рис. 1 за відповідної відносної вологості.

2. У разі збігу даних, обчислювати параметри та достовірність кожного можливого ареалу і зберігати їх у таблиці.

3. Після завершення пошуку усіх варіантів проводити аналіз їх достовірності. Пропонується ігнорувати варіанти, достовірність яких була меншою 0,45, тобто такі, які припасовані тільки за однією кривою (лише одне вага за RH = 20 % перевищує рівень 0,45, але така вологість для широт, де в Україні розташовані пости ЄАМ, є малоймовірною). Хоча можна виводити на графіку й усі варіанти, але усі менш достовірні — кольором малої інтенсивності.

4. Перейти від полярних до декартових координат і побудувати на графіку еліпси з визначеними параметрами, колір яких пропорційний рівню достовірності в одній кольоровій гамі.

5. Найімовірніші ареали знаходяться на перетині найбільшої кількості еліпсів з найбільшою достовірністю.

Безпосередньо припасовування експериментальних даних до кривих з рис. 1 пропонується здійснювати таким чином:

1. Оптимально використовувати метеодані, інтерпольовані між найближчим і сусідніми метеопостами у напрямку аналізованого сектора, тобто брати напрям і швидкість вітру, вологість саме тих об'ємів повітря, які переніс вітер за той час, що розділяє сусідні вимірювання. Але, у першому наближенні, можна брати й дані одного ряду з найближчого метеопоста поточне і попередні. У цьому разі варто брати середнє двох сусідніх значень.

2. Для перевірки при припасовуванні наборів 2—3 точок пропонується обчислювати у скільки разів перша точка з цього набору більша (чи менша) за значення типової кривої з рис. 1 при визначеній у п.1 вологості RH. А потім на цей масштабувальний коефіцієнт перемножити усі інші значення набору і перевірити чи збігається нахил експериментальної кривої з типовим з рис. 1 з точністю до заданого ε . При цьому варто враховувати ще той факт, що вітер може змінювати напрям,

поки пиліок долетить від місця продукування до поста ЄАМ і, в результаті, пролетить більшу відстань, ніж, якщо він летів би по прямій. А отже, реальне значення у наборі мало бути б зафіксоване раніше, а насправді — пізніше. Більше того, така похибка накопичується: чим у пізніший час доби пиліок зафіксований, тим більшою є така похибка. В ідеалі, слід було б провести трасування по траєкторіях вітру кожного об'єму повітря між найближчим і наступним за ним метеопостами у заданому секторі, як це робиться в Європі [5], але, у першому наближенні, можна просто враховувати такі зміни певною сталою h , назвемо її коефіцієнтом «деформованості» графіка через зміни напрямку вітру, яку слід домножати на поточний час доби, за який проводиться аналіз експериментальних даних. Тобто, допустимими значеннями для аналізу нахилів за рис. 1 є не тільки у $(x_i - \tau)$ типової кривої з рис. 1, а й значення у $(x_i - \tau \pm hx_i)$. При цьому слід врахувати, що розширення допустимих значень для усіх точок набору означає, що розширяється і діапазон допустимих нахилів під час перевірки відповідності експериментальних даних відповідному сплайну. Продемонструємо як це формалізується математично на прикладі сплайну першого порядку (рис. 4).

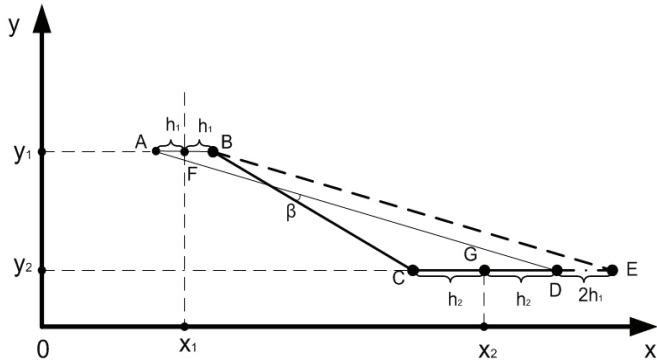


Рис. 4. Геометрична інтерпретація процесу визначення допустимої множини значень для нахилу між парою точок експериментальних даних за сплайном першого порядку, що з'єднує дві точки $x_1 \pm h_1$ та $x_2 \pm h_2$ із запізненням $\tau = 0$, з урахуванням деформованості графіка, через зміну напрямку вітру, шляхом врахування коефіцієнтів h_1 та h_2 , відповідно

ураховуємо як це формалізується математично на прикладі сплайну першого порядку (рис. 4). Нехай аналізується чи потрапляє нахил прямої, яка з'єднує дві послідовні точки експериментальних даних у моменти x_1 та x_2 у допустимий діапазон, який задає типовий сплайн першого порядку між точками $x_1 \pm h_1$ та $x_2 \pm h_2$ із запізненням (для простоти опису): $\tau = 0$. Збіг має бути в межах заданої похибки ϵ .

З рис. 4 видно, що уся множина нахилів кривих, яка є допустимою між усіма точками відрізків $x_1 \pm h_1$ та $x_2 \pm h_2$, розташована між діагоналями BC та AD, включно з ними. Водночас, пряма BE матиме той самий нахил, що й AD, тобто уся множина допустимих нахилів розташована в межах трикутника BCE і для нахилів його сторін BC та AD, як нескладно показати, є такий досить

простий опис

$$k_1 = \frac{dy}{dh + dx + 2h_1}; \quad k_2 = -\frac{dy}{dh - dx + 2h_1}; \quad (6)$$

$$dx = x_2 - x_1; \quad dy = y_2 - y_1; \quad dh = h_2 - h_1.$$

На практиці слід обчислити k_1 та k_2 . Потім визначити яке значення з них мінімальним, а яке – максимальним, а тоді множина допустимих нахилів k для пар точок експериментальних даних буде задаватись такою множиною значень:

$$k = [k_{\min} - \epsilon, k_{\max} + \epsilon];$$

$$k_{\min} = \min(k_1, k_2); \quad k_{\max} = \max(k_1, k_2). \quad (7)$$

Для оцінювання параметрів ареалів за рис. 2 важливо зазначити, що кути α_1 , α_2 , β задаються у градусах або, для обчислення з використанням стандартних комп'ютерних функцій, в радіанах. Водночас ці кути вираховуються за кутами метеорологічних даних щодо напрямку вітру, які, як відомо, мають іншу точку відліку та обхід кола в іншому напрямку. Для обчислення, наприклад, кута α_1 слід використовувати таке співвідношення:

$$\alpha_1 = (450 - \alpha_{1m}) \% 360,$$

де α_{1m} — метеорологічна інформація щодо напрямку вітру, град.; операція « $\% 360$ » — це взяття залишку від ділення націло (у позначеннях мови програмування R). Наприклад, куту $\alpha_{1m} = 80^\circ$ відповідає: $\alpha_1 = 10^\circ$, а куту $\alpha_{1m} = 350^\circ$ відповідає: $\alpha_1 = 10^\circ$.

Визначення параметрів починаємо з оцінювання відстані до центру еліпсу уздовж усередненої осі напрямку вітру, тобто довжини L_x (у кілометрах) відрізка OA:

$$L_x = \gamma v(\tau + 1), \quad (9)$$

де γ — безрозмірний коефіцієнт перенесення пилку, який враховує наскільки швидкість поширення пилку у повітрі є меншою від середньої швидкості вітру (визначається забудовою місцевості, приземною рослинністю, відмінністю метеофакторів у приземному шарі на шляху перенесення пилку до поста ЄАМ відносно їх значень у місці розташування метеопосту тощо), в загальному випадку цей коефіцієнт є функцією часу та простору, але у першому наближенні його можна вважати константою, яку, однак, краще визначати за експериментальними даними та польовими дослідженнями, наприклад, по декількох точно відомих ареалах амброзії, координати яких оцінені цим методом з прийнятною достовірністю; v — середня швидкість вітру (середнє значення набору точок, які аналізуються), км/год; τ — запізнення, год.

Як видно з (9), центр ареалу враховує відстань, з якої надійшов пилкок зі швидкістю v із запізненням τ . Вираз $(\tau + 1)$ має на меті врахувати обмеження методу щодо визначення координат до центру ареалу, розташованого безпосередньо на території навколо місця розташування вимірювального приладу ЄАМ, який дає мінімальне (нульове) запізнення $\tau = 0$. Обмеженням цього методу для території України, як було зазначено вище, є мінімальний двогодинний інтервал вихідних даних. Отже, метод не може дати розміри найближчого ареалу точніше, ніж від 0 до $2\gamma v$, тобто до відстані, яку пролітає пилкок за 2 години. А це означає, що координати центру не можуть бути визначеними точніше за γv , тобто за 1 годину льоту пилку. Водночас запізнення τ не може бути визначене точніше, ніж $\tau = 2$ години. Отже, за умови $\tau = 0$ формула (9) повинна давати координати γv .

Розмірами ареалу уздовж бісектриси сектора, тобто радіусом R_x пропонуємо враховувати невизначеність динаміки перенесення пилку, яка містить в собі невизначеність щодо зміни напрямку вітру (оцінюється максимальною додатковою деформованістю, яка оцінюється добутком $(h + 1)$ на час $(\tau + 1)$, що відповідає тривалості польоту пилку з центру ареалу), невизначеність щодо швидкості вітру (оцінюється різницею між максимальною швидкістю v_{\max} вітру з усіх точок спостережень набору значень, що аналізується, та середньої швидкості v , за якою обчислюється відстань L_x) і невизначеність динаміки перенесення пилку (оцінюється коефіцієнтом γ):

$$R_x = \gamma(v_{\max} - v + v_0)(h + 1)(\tau + 1), \quad (10)$$

де v_0 — швидкість вітру, яка буде задавати мінімальний радіус еліпса на графіку для випадку, коли швидкість вітру не зазнавала змін і вираз $(v_{\max} - v)$ дорівнюватиме нулю.

Решта геометричних параметрів обчислюється за відстанню L_x та кутах α_1 , α_2 і β з використанням відомих геометричних співвідношень, враховуючи, що відрізок АВ є перпендикулярним відрізку ОВ, що впливає з умови про те, що еліпс повинен мати центр у точці А, розташованій на бісектрисі кута β , а його точки не повинні виходити за межі сектора, обмеженого кутами α_1 та α_2 :

$$R_y = \left| L_x \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right| = \left| L_x \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \right|; \quad (11)$$

$$\Omega = \alpha_1 + \beta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}; \quad (12)$$

$$Y = Y_0 + L_x \sin(\Omega); \quad (13)$$

$$X = X_0 + L_x \cos(\Omega); \quad (14)$$

$$S = \pi R_x R_y. \quad (15)$$

Важливо зазначити, що формули (13), (14) можуть мати й інший вигляд, в залежності від системи координат, яку використовує комп'ютерна програма (в багатьох з них точка відліку розташована у лівому верхньому куті екрану). Вигляд же формул (13), (14) відповідає рис. 2 та використаний для автоматизації цього методу комп'ютерній програмі на R з використанням пакету «Plotrix» для побудови еліпсів.

Останній з параметрів — інтенсивність I — визначається як середнє з чисел, які обчислюються діленням усіх експериментальних даних з набору на значення типових кривих графіка рис. 1, у відповідні моменти часу, з урахуванням запізнення:

$$l = \sum_{i=1}^M \left| \frac{y_i(x_i)}{y_1(x_i - \tau)} \right| / M. \quad (16)$$

Розглянемо приклад застосування запропонованого методу.

Приклад моделювання

Запропонуємо розроблений метод для оцінювання параметрів (X , Y , R_x , R_y , S , l) можливих ареалів амброзії за даними лише одного посту ЄАМ, розташованого у м. Вінниця, за умов невизначеності та мінімальної кількості даних, які властиві цим даним. На R авторами розроблена комп'ютерна програма для автоматизації усіх вищенаведених розрахунків. Для того, щоб забезпечити оцінювання параметра γ , відповідно до рекомендацій, дослідили дані за 2014 рік, оскільки саме у цьому році здійснено консолідування та картування даних Вінницької міськради та Державної фітосанітарної інспекції Вінницької області (позначені тонкими червоними лініями на рис. 5а та 5б) [4], [7]. Причому просторова неоднорідність (розташування у різних секторах та на різній відстані) виявлених ареалів амброзії дозволяє сподіватись на досить високу достовірність оцінювання параметра γ . Для перевірки використовувались дані за 2013 рік, які теоретично можуть відрізнятись, але, оскільки амброзія — багаторічна рослина, то навряд чи ареали кардинально змінили своє місце розташування за рік.

Проведено аналіз усіх наявних даних ЄАМ, наданих лабораторією аеробіологічного моніторингу під керівництвом професора В. В. Родінкової з Вінницького національного медичного університету ім. М. І. Пирогова (ВНМУ) за 2013—2014 рр., яким відповідав напрямок вітру у секторі $[0, 120]$ (нагадуємо, що для переходу до більш звичних у тригонометрії кутів від кутів, прийнятих у метеорології, слід скористатись виразом (8)).

Ініційовано перебір варіантів секторів шляхом поділу цього діапазону $[0, 120]$ на окремі сектори з кроком $1/2, 1/3, 1/4, 1/6, 1/10, 1/12$ та $1/20$ і для кожного з них проаналізовано можливі ареали з перебором збігу з типовими сплайнами першого порядку з нахилами з табл. 1 по двох чи трьох послідовних точках. При цьому враховувалась можлива деформованість графіка, через зміни напрямку вітру, та обчислювались параметри і достовірність виявлених ареалів. Щоб не загубити хоча б якісь закономірності, за граничне значення достовірності вибрано $D > 0,3$. У табл. 1 ця умова виконується для 35 %, але вони охоплюють 67 % ваг. Найбільшу достовірність матимуть криві, які припасувались по одразу двох кривих. Еліпси, які відповідають ареалам з достовірністю $D > 0,6$ (тобто припасовано не менше 2-х послідовних кривих) позначено чорним кольором, $D > 0,3$ — кольорами в гамі сірого, насиченість яких пропорційна цій достовірності (рис. 5а).

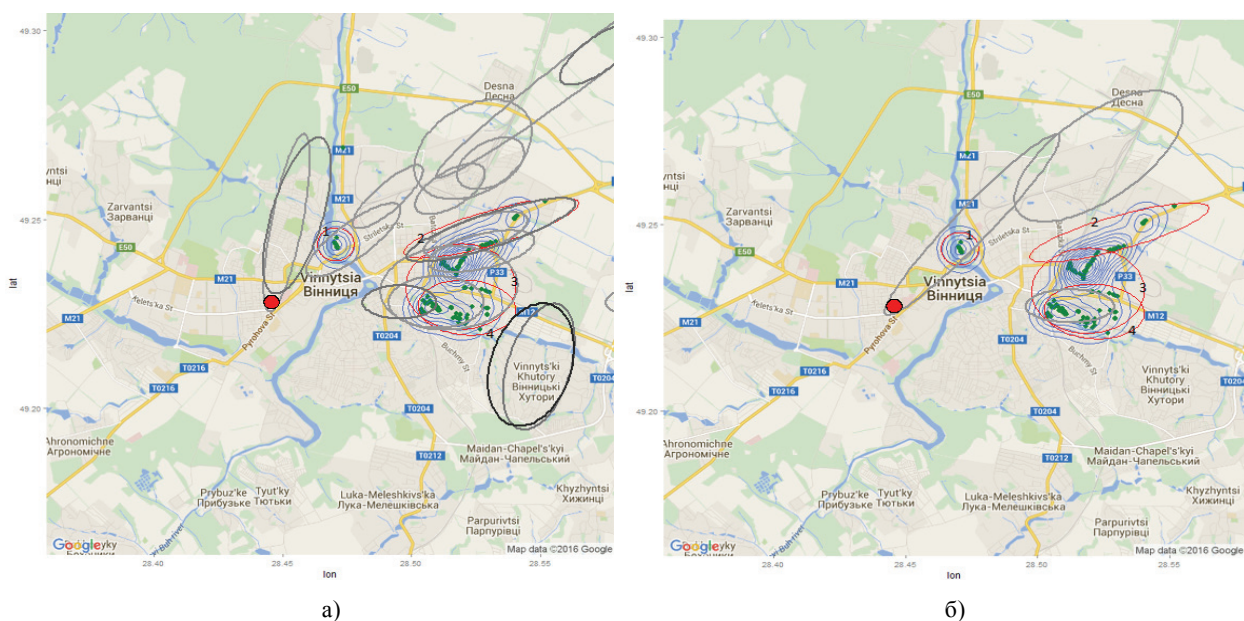


Рис. 5. Результат порівняння місць розташування ареалів амброзії полинолістої у м. Вінниця, визначених шляхом польових досліджень 2014 року (червоні тонкі лінії) та оцінених запропонованим методом з використанням для апроксимації типових сплайнів першого порядку (товсті чорні лінії) для напрямків вітру у секторі $[0, 120]$ з точністю $\varepsilon = 0,01$ за даними: а — 2014 року; б — 2013 року

Відносні та абсолютні похибки точності оцінювання параметрів ареалів відносно їх орієнтовних значень за даними польових досліджень

№ ареалу на рис. 5	Рік	X , %	Y^* , %	Y , км	R_x , %	R_y , %	Кут*, %	Кут, град.	L_x , %	S , %
1	2014	4	25	0,22	225	1	7	2,9	5	229
2	2014	9	9	0,11	2	2	11	2,0	7	3
3	2014	22	100	0,13	13	40	100	2,2	22	48
4	2014	24	100	0,25	3	6	100	4,0	24	9
1	2013	10	66	0,59	617	0	17	7,1	17	617
2	2013	29	100	1,2	53	2	100	18,0	32	54
3	2013	18	100	0,13	21	62	100	2,2	19	70
4	2013	21	100	0,25	11	40	100	4,0	21	47

Примітка: * — у деяких випадках результат оцінювання давав нульові значення, що призводило до відносної похибки в 100 %, у таких випадках визначалась ще й абсолютна похибка цих параметрів.

Як видно з аналізу рисунків 5а, б та табл. 2, має місце досить високий збіг даних польових обстежень та даних, отриманих розрахунковим шляхом, особливо, якщо врахувати той факт, що польові дослідження проводились не на всій території міста, а лише у місцях щільної житлової забудови. Особливу цікавість викликають знайдені можливі інші ареали амброзії або ці ж ареали, але більшого розміру. Зокрема, на рис. 5а можливі ареали відповідають ще й іншим зонам: ареал безпосередньо біля поста ЄАМ і на північний схід від нього — це парк біля ВНМУ, потім Центральний міський парк Вінниці і далі — П'ятничанський ліс та ліс під Вінницею; багато ареалів ще далі за малим відомим осередком амброзії — це колишня індустріальна зона міста; ареали на схід та північний схід, у т.ч. ареали з високою достовірністю ($D > 0,6$) це — долина річки Вінничка у приватному секторі жителів міста — усі ці місця добре підходять, як потенційно сприятливі для поширення амброзії. Що цікаво, оцінки параметрів найімовірніших основних ареалів за даними 2013 року теж збігаються, хоча й гірше. Такий результат очікуваний, оскільки у 2013 році точні параметри ареалів мали дещо відрізнятись.

Виявлені закономірності, вочевидь, будуть цікавими і корисними як для органів влади і фахівців медичної галузі, біологам, екологам, так і для широких верств населення. Комунальні служби борються з осередками амброзії, біологи їх досліджують, а для населення цінним є алергопрогноз, який з урахуванням метеопрогнозу показує коли і де матимуть місце підвищені ризики появи у повітрі певних видів алергенного пилку. Розроблений у цій статті метод дозволить підвищити точність такого алергопрогнозу та ефективність прийнятих рішень з реагування на виявлені нові можливі ареали амброзії, але спочатку слід все ж таки провести польове обстеження у виявлених можливих зонах.

Висновки

Розроблено метод просторово-хронологічного оцінювання параметрів ареалів амброзії за даними лише одного посту Європейської системи аеробіологічного моніторингу (ЄАМ). Зазначено, що низька регулярність мережі постів ЄАМ на території України не дає можливості застосовувати точні математичні моделі SILAM для моделювання процесів поширення пилку амброзії в повітрі. Цей висновок збігається з висновком європейських вчених у провідних наукових виданнях, що робить актуальним створення менш точних методів, але таких, які дозволили б проводити моделювання за умов суттєвої невизначеності задачі та мінімальної кількості вхідних даних. В першу чергу, це зумовлено тим, що вітер, що переносить пилки, часто змінює напрям і, якщо в Європі один пост доповнює інший, охоплюючи весь пилки, то в Україні, де відстань між постами сягає 280 км і більше, потрібні нові методи аналізу даних на основі часового ряду лише одного поста ЄАМ, які враховували б, що пост ЄАМ протягом навіть однієї доби часто фіксує пилки, принесений з різних ареалів. Тобто часовий ряд є сумою різних вибірок даних і розроблювані методи повинні мати можливість виокремлювати ці вибірки та аналізувати кожну окремо.

Адаптовано до України відомі дані типових кривих інтенсивності продукування пилку амброзії протягом доби після сходу сонця, в залежності від відносної вологості повітря шляхом переходу

від одногодинного до двогодинного інтервалу, що відповідає кроку спостережень саме в Україні. Проведено аналіз можливих підходів до аналітичного опису цих кривих. Встановлено, що для ідентифікації складних аналітичних функцій не вистачає даних (кількість ненульових значень дорівнює від 3 до 6), а апроксимація квазідзвінницевою функцією, функцією Гауса, логістичними, тригонометричними і поліноміальними функціями з мінімальною кількістю параметрів не дає необхідної точності та монотонності. Тому запропоновано використовувати сплайн-апроксимацію першого (прямими) та другого (параболами) порядку. Зазначено, що використання сплайнів першого порядку дозволяє припасувати будь-яку типову криву, навіть по двох точках. Однак, таке припасовування може давати хибні збіги, тому запропоновано критерій достовірності на основі врахування ваг припасованих сплайнів, які обчислюються як питомий внесок кожного сплайну в опис площі під усією типовою кривою: чим більше припасовано сплайнів по послідовних наборах точок експериментальних даних, тим вища достовірність апроксимації.

Відмічено, що через зміну напрямку вітру протягом однієї доби, пилок може пролітати більшу відстань до поста ЄАМ і тому виміряні дані можуть фіксуватись з певним запізненням, причому ця невизначеність наростає з відстанню, а отже — з часом (пізніше прилітає пилок, який пролетів більшу відстань). Запропоновано враховувати цю особливість коефіцієнтом деформованості. Визначено математичні умови для обчислення допустимих значень експериментальних прямих з урахуванням цього коефіцієнта на прикладі використання сплайну першого порядку.

Розроблено новий метод просторово-хронологічного оцінювання можливих місць розташування та інтенсивності продукування пилку ареалами амброзії за даними лише одного посту Європейської системи аеробіологічного моніторингу за умов невизначеності та мінімальної кількості даних з використанням сплайн-апроксимації типових моделей продукування пилку та низки оригінальних підходів до усунення невизначеності різних параметрів процесу.

Працездатність методу підтверджена на реальних даних — підтверджено відомі та виявлені нові можливі ареали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. В. Родінкова, «Основний аеропалінологічний спектр міст центральної, південної та східної України,» *Досягнення біології та медицини*, № 2 (22), с. 11-15, 2013.
- [2] M. Sofiev et al, "A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Description of the emission module," *Int. J. Biometeorol.*, 57, p. 45-48, 2013. doi: 10.1007/s00484-012-0532-z.
- [3] Michael D. Martin, Marcelo Chamecki, and Grace S. "Brush Anthesis synchronization and floral morphology determine diurnal patterns of ragweed pollen dispersal," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 150, pp. 1307-1317, 2010. doi 10.1016/j.agrformet.2010.06.001.
- [4] V. B. Mokin, V. V. Rodinkova, T. Y. Vuzh, W. Wójcik, and S. Sailarbek "The improvement of the volumetric monitoring system to raise the analysis accuracy for the allergic pollen found in the city atmosphere," *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 5/2017, r. 93. doi: 10.15199/48.2017.05.17.
- [5] A. Stach M. Smith, C. A. Skjith, and J. Brandt, "Examining Ambrosia pollen episodes at Poznań (Poland) using back-trajectory analysis," *International Journal of Biometeorology*, vol. 51, issue 4, pp. 275-286, March. 2007.
- [6] В. М. Дубовий, Р. Н. Кветний, О. І. Михальов, та А. В. Усов, *Моделювання та оптимізація систем*. Вінниця, Україна: ПП «ТД Едельвейс», 2017, с. 116-125.
- [7] В. Б. Мокін, та В. А. Цимбалюк «Методика просторово-хронологічного визначення територій населених пунктів з підвищеною для життєдіяльності населення безпекою через вплив алергенних рослин,» *Екологічна безпека та природокористування*, № 3, с. 73-80, 2015.

Рекомендована кафедрою системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.02.2018

Мокін Віталій Борисович — д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки, e-mail: vbmokin@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Вуж Тетяна Євгенівна — старший викладач кафедри біологічної фізики, медичної апаратури та інформатики, e-mail: tatiana.vuzh@gmail.com .

Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова

V. B. Mokin¹
T. Ye. Vuzh²

The method of Spatio-temporal Estimation of Parameters of Ambrosia Areas According to the Data of Only One Post of the European System of Aerobiological Monitoring

¹Vinnitsia National Technical University;

²National Pyrogov Memorial Medical University, Vinnitsia

The article is devoted to the development of the method of spatio-temporal estimation of the parameters of areas of ambrosia according to the data of only one post of the European Aerobic Monitoring System (EAM). It is noted that the low regularity of the EAM postal network on the territory of Ukraine does not allow the use of precise mathematical models (for example, SILAM) for modeling the processes of airborne embargo explosion in the air. This makes it more urgent to create less precise methods, but those that would allow simulation to be carried out under conditions of significant uncertainty of the task and the minimum amount of input data.

Adapted to Ukraine are known data of typical curves of the intensity of pollen production of ambrosia during the day after sunrise, depending on the relative humidity of the air by moving from the 1-hour to 2-hour interval, which corresponds to the step of observation in Ukraine. It is established that for the approximation of these curves, the complex functions lack data (there are only 3 to 6 points), and logistic, polynomial and other functions do not provide the necessary accuracy and monotony. Therefore, it was proposed to use the spline approximation of the first (line) and the second (parabola) order. This allows you to fit any typical curve, even at 2-3 points. However, such an attachment may lead to false coincidences; therefore, the validity criterion based on the weighting of the applied splines is proposed: the more splines are applied, the higher the accuracy of the approximation.

It is noted that due to a change in the direction of the wind within one day, the pollen can fly a greater distance to the EAM post, and therefore the measured data may be delayed. It is proposed to take into account this feature by the coefficient of deformity. The mathematical conditions for its inclusion are derived.

For the first time a method of spatio-chronological estimation of possible locations and intensity of pollen production in the areas of amygdala was developed on the basis of data of only one post of the EAM in conditions of uncertainty and the minimum amount of data using spline approximation of typical pollen production models.

The efficiency of the method is confirmed by real data — the known and discovered new possible habitats were confirmed.

Keywords: pollen ragweed, spline interpolation, spatio-temporal model, European system of aerobiological monitoring, uncertainty of the problem.

Mokin Vitalii B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Systems Analysis, Computer Monitoring and Engineering Graphic, e-mail: vbmokin@gmail.com ;

Vuzh Tetiana Ye. — Senior Lecturer of the Chair of Biophysics, Informatics and Medical Equipment, e-mail: tatiana.vuzh@gmail.com

В. Б. Мокин¹
Т. Е. Вуж²

Метод пространственно-хронологической оценки параметров ареалов амброзии по данным только одного поста Европейской системы аэробиологического мониторинга

¹Винницкий национальный технический университет;

²Винницкий национальный медицинский университет им. Н. И. Пирогова

Разработан новый метод пространственно-хронологической оценки возможных мест расположения и интенсивности выработки пыльцы ареалами амброзии по данным только одного поста Европейской системы аэробиологического мониторинга в условиях неопределенности и минимального количества данных с использованием сплайн-аппроксимации типовых моделей выработки пыльцы и ряда подходов к устранению неопределенности различных параметров процесса. Работоспособность метода подтверждена на реальных данных — подтвердились известные и выявлены новые возможные ареалы.

Ключевые слова: пыльца амброзии полыннолистной, сплайн-интерполяция, пространственно-хронологическая модель, Европейская система аэробиологического мониторинга, неопределенность задачи.

Мокин Виталий Борисович — д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа, компьютерного мониторинга и инженерной графики, e-mail: vbmokin@gmail.com ;

Вуж Татьяна Евгеньевна — старший преподаватель кафедры биологической физики, медицинской аппаратуры и информатики, e-mail: tatiana.vuzh@gmail.com