

УДК 551.501(-045.33):[551.50.313.6:551.50.313.43]

Л.М. Кацалова, В.М. Шпиг

ВАРІОГРАФІЧНІ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ МЕТЕОВЕЛИЧИН НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ДЛЯ КРІГІНГ-ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

У статті описано поняття варіографії та представлено найпоширеніші варіографічні моделі. Запропоновано алгоритм визначення оптимальної моделі для інтерполяції даних прогнозу метеопараметрів методом крігінга. Проведено визначення оптимальних моделей для крігінг-інтерполяції полів температури, тиску та опадів, що отримані за допомогою моделі COSMO для території України.

Ключові слова: варіографія, експериментальна варіограма, варіографічна модель, інтерполяція, метод крігінга.

Вступ

На сьогодні в світі існує невелика кількість атмосферних моделей глобального та регіонального масштабів, що дають змогу отримати прогноз для будь-якої території, зокрема України. Серед них ETA, WRF і COSMO, які використовуються або ж використовувалися в УкрГМІ. Практика показала, що робота цих моделей повною мірою не враховує ландшафт України, особливості підстильної поверхні, що, передусім, призводить до неточностей прогнозу погоди. Для коригування цих неточностей необхідно проводити пост-модельну обробку отриманих даних та їх адаптацію до особливостей території України. Метеорологічні моделі також дають значення метеовеличин на певній сітці, що не збігається з сіткою метеостанцій, яка є нерегулярною. Остання обставина дещо ускладнює роботу щодо верифікації прогнозів моделі та потребує застосування методів інтерполяції.

У роботі [1] було запропоновано використовувати крігінг-інтерполяцію для приведення даних моделі COSMO до сітки метеостанцій України. Подальшу роботу авторів орієнтовано на опрацювання результатів саме цієї моделі й створення системи пост-модельної обробки прогнозу погоди в кінцевому результаті. Метод крігінга дає можливість не тільки точно (порівняно з відомими інтерполянтами) провести інтерполяцію даних й оцінити похибки, але й врахувати під час інтерполяції таку важливу складову прогнозу, як рельєф підстильної поверхні.

Використання крігінга передбачає побудову варіографічних моделей, закладених у метод [2]. Застосування тієї чи іншої моделі впливає на точність крігінг-інтерполяції та вимагає попереднього дослідження. Побудова варіографічних

моделей, які найкраще підходять для описання просторового розподілу різних метеопараметрів для території України, **становить мету** й суть цієї роботи, де досліджуються результати прогнозу COSMO за температурою, приземним тиском та кількістю опадів і визначаються варіографічні моделі – варіограми.

Варіографія

Однією з важливих властивостей усіх природних явищ є просторова неперервність: тобто взаємна залежність для значень у точках, розташованих ближче одна до одної, більше ніж для тих, що віддалені між собою на більшу відстань. Найчастіше просторову неперервність просторово розподілених даних описують за допомогою напівваріограм або варіограм і встановлення характеру залежності (кореляції) між даними називають варіографією. Суть варіографії полягає у виявленні наявності кореляційної структури даних та визначенні її особливостей. Кінцевою метою варіографії є побудова математичної функції, що описує просторову кореляційну структуру даних, яку в подальшому можна використовувати геостатичними методами, зокрема крігінгом. Від якості отриманої моделі залежить якість роботи методу та величина похибок.

Кореляційний аналіз починають з побудови експериментальної варіограми. Експериментальна варіограма розраховується за формулою для всіх пар точок вимірювання, відстань між якими дорівнює h :

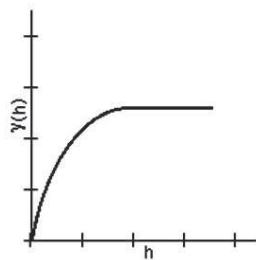
$$y(h) = 0.5 \cdot \text{average} \left((V(x_i) - V(x_j))^2 \right) \quad (1)$$

для всіх $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ таких, що $|x_i - x_j| = h$.

Варіограми, що відображають просторову структуру даних, розраховано за допомогою теоретичних моделей. Експериментальна варіограма є лише набором значень для певних просторових кроків, тоді як теоретична модель дозволяє отримати її значення для будь-якого h .

Основні типи моделей варіограм називаються відповідно до функцій, які їх описують. Моделі бувають таких типів [3, 4, 5]:

- Сферична (1)

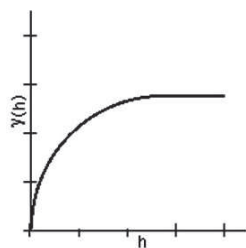


$$\gamma(h) = c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), \quad 0 < h \leq a,$$

$$\gamma(h) = c_0 + c, \quad h > a,$$

$$\gamma(0) = 0$$

- Кругова (2)



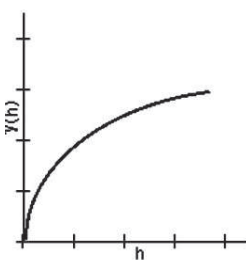
$$\gamma(h) = c_0 + c \frac{2}{\pi} \left(\frac{h}{a} \sqrt{1 - \frac{h^2}{a^2}} + \arcsin \left(\frac{h}{a} \right) \right),$$

$$0 < h \leq a,$$

$$\gamma(h) = c_0 + c, \quad h > a,$$

$$\gamma(0) = 0$$

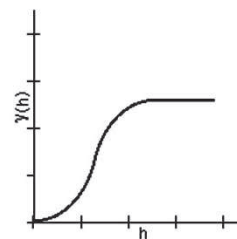
- Експоненціальна (3)



$$\gamma(h) = c_0 + c \left(1 - \exp \left(-\frac{h}{r} \right) \right), \quad h > 0,$$

$$\gamma(0) = 0$$

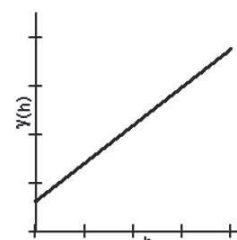
- Гаусова (4)



$$\gamma(h) = c_0 + c \left(1 - \exp \left(-\frac{h^2}{r^2} \right) \right), \quad h > 0,$$

$$\gamma(0) = 0$$

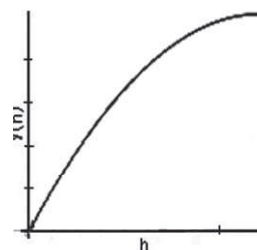
- Лінійна (5)



$$\gamma(h) = c_0 + c \left(\frac{h}{a} \right), \quad 0 < h \leq a,$$

$$\gamma(h) = c_0 + c, \quad h > a, \quad \gamma(0) = 0$$

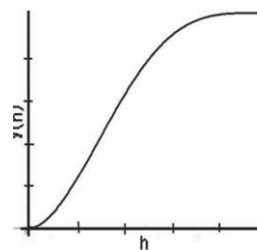
- Квадратична (6)



$$\gamma(h) = c_0 + c \frac{h}{a} \left(1 - \frac{h}{a} \right), \quad h > 0,$$

$$\gamma(h) = c_0 + c, \quad h > a, \quad \gamma(0) = 0$$

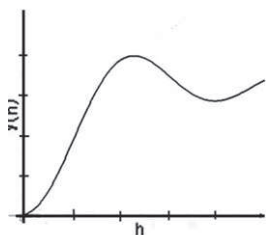
- Кубічна (7)



$$\gamma(h) = c_0 + c \left(\frac{7h^2}{a^2} - \frac{35h^3}{4a^3} + \frac{7h^5}{2a^5} - \frac{3h^7}{4a^7} \right),$$

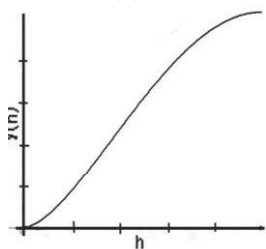
$$h > 0, \quad \gamma(h) = c_0 + c, \quad h > a, \quad \gamma(0) = 0$$

- Наггет-ефект (8)



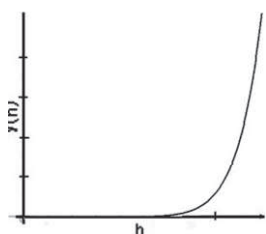
$$\gamma(h) = c_0 + c \left(1 - \frac{1}{h} \sin(h) \right), \quad h > 0, \\ \gamma(0) = 0$$

- Логарифмічна (9)



$$\gamma(h) = c_0 + c \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(1 - \ln \left(\frac{h^2}{a^2} \right) \right), \quad h > 0, \\ \gamma(h) = c_0 + c, \quad h > a, \\ \gamma(0) = 0$$

- Степенева (10)



$$\gamma(h) = c_0 + c(h)^a, \quad h > 0, \\ \gamma(0) = 0$$

де a – дійсний радіус кореляції: відстань, на якій існує залежність даних. Для сферичної і кругової моделі $\gamma(a) = c_0 + c$, тобто на відстані a значення варіограми не перевищують певного значення (плато варіограми). Це означає, що залежність між даними на відстані більшій дійсного радіусу відсутня. r – ефективний радіус кореляції: на цій відстані варіограма досягає 95 % свого плато. У гаусівській і експоненціальній моделі плато досягається асимптотично. Це означає, що залежність між даними існує всюди, проте зменшується зі збільшенням відстані між точками. Лінійна та степенева моделі підходять для даних, залежність між якими залишається сильною й

на великих відстанях між точками. Для даних, залежність між якими слабка, підходить модель «наггет-ефект».

Визначення моделі

Розподіли значень різних метеовеличин по території України суттєво різняться. Відмінним є і взаємозв'язок між даними для кожного метеорологічного параметра на різних відстанях. Тому використання крігінга для інтерполяції даних прогнозу погоди потребує проведення додаткового дослідження, метою якого є визначення оптимальної варіографічної моделі для кожного параметра. Для цього авторами запропоновано такий підхід: визначити оптимальну модель для кожного набору даних температури, тиску та опадів, як найважливіших складових прогнозу погоди, що отримані за допомогою COSMO, і, провівши аналіз результатів, визначити оптимальну модель для кожного з обраних параметрів загалом.

Визначення оптимальної моделі проводиться методом перебору вказаних вище теоретичних моделей, які будуються на основі експериментальної варіограми певного набору даних прогнозу метеопараметра. Визначення оптимальної моделі ґрунтується на обчисленні максимальної $\varepsilon = \max_{i=1, N} |y(h_i) - \gamma(h_i)|$ та середньоквадратичної

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (y(h_i) - \gamma(h_i))^2}{N}$$

похибок відхилення теоретичної варіограми від експериментальної. Хоча під час підбору моделі для крігінг-інтерполяції використовують в основному середньоквадратичну похибку, автори вважають, що для інтерполяції даних прогнозу погоди більш показовою є максимальна похибка. Її величина в деякій точці може компенсуватися більшою точністю в інших точках. У таких випадках σ буде мале за значного ε , що може призвести до великої похибки інтерполяції в деякій точці, а значить до неточного прогнозу погоди для певної місцевості.

Модель, для якої вказані похибки найменші, вважається оптимальною для набору даних, що розглядаються.

Дослідження проводиться на вибірці даних прогнозу температури, тиску та опадів за квітень, липень, жовтень 2013 р. та січень 2014 р. Така вибірка дає можливість визначити залежність даних не тільки щодо окремого метеопараметра, а також зміну його варіографії залежно від сезону.

Отже, дослідження проводили за таким алгоритмом:

- для кожного набору даних прогнозу мо-

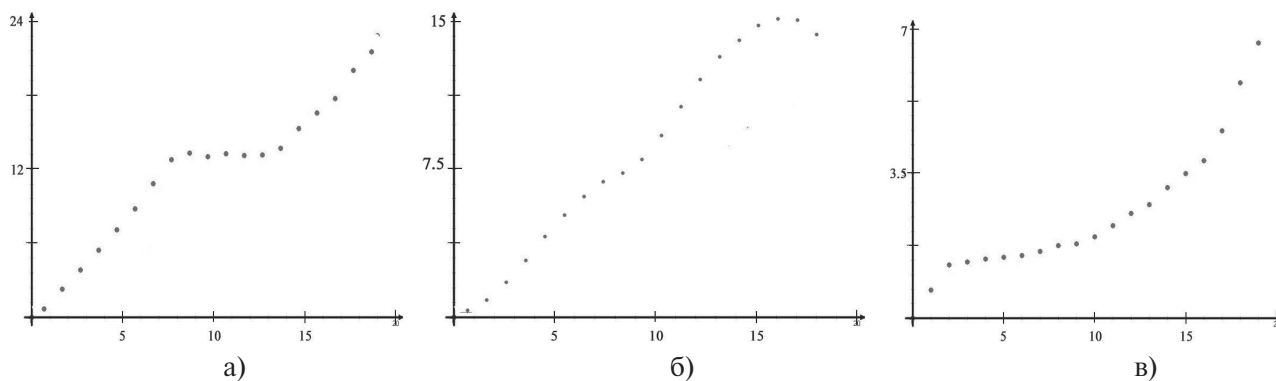


Рис 1. Експериментальна варіограма для даних: а) температури, б) тиску, в) опадів на 9:00, 8.04.2012 р.

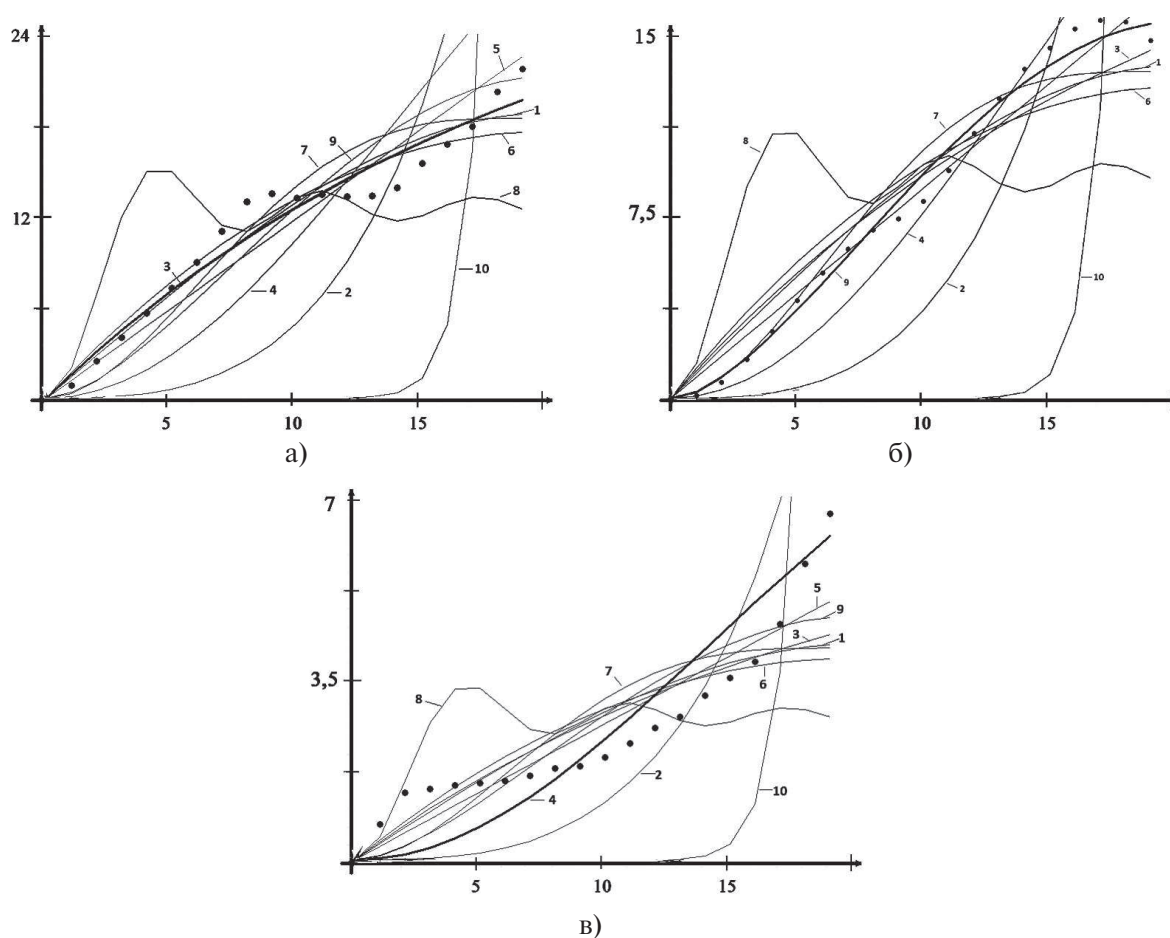


Рис 2. Графіки моделей (1) – (10), побудованих для експериментальних варіограм: а) температури, б) тиску, в) опадів на 9:00, 8.04.2012; жирною лінією виділено оптимальну модель

делі COSMO за температурою, тиском, опадами будували експериментальну варіограму;

- по точках експериментальної варіограми за допомогою методу найменших квадратів [6] будували моделі (1) – (10), наведені в попередньому розділі;

- для кожної з побудованих моделей визначали значення максимальної ε та середньоквадратичної σ похибок;

- шукали модель, для якої значення похибки найменше;

- проводили вказану вище послідовність дій для кожного набору вибірки.

Температура

Результати визначення варіографічної моделі для крігінг-інтерполяції даних прогнозу моделі COSMO за температурою наведено в табл. 1. Із

неї бачимо, що для крігінг-інтерполяції даних прогнозу температури немає однієї моделі, що давала б оптимальне наближення для всіх наборів даних. Це означає, що залежність між даними різна для різних моментів часу. Фізично це цілком виправдано, адже температурне поле України формується під дією різних атмосферних процесів, що мають різні масштаби, тривалість та відрізняються за іншими характеристиками. Фактично, отримані результати свідчать про динамічність температурного поля та постійну зміну не лише значення температури, а й ступеня залежності між цими значеннями.

Проте із табл. 1 видно, що із запропонованих десяти варіографічних моделей не всі підходять для опису розподілу температури на території України.

Оптимальними для крігінг-інтерполяції температурного поля на території України є квадратична, експоненціальна, лінійна та гаусова моделі. Оптимальність цих моделей указує на те, що існує залежність між значеннями температури в точках сітки, що може асимптотично зменшуватися зі збільшенням відстані між точками. Різняться лише асимптотика зменшення залежності.

Той факт, що моделі (3) – (5) є оптимальними і за максимальною, і за середньоквадратичною похибками, також свідчить про існування варіографічної залежності між даними прогнозу температури.

Аналізуючи дані за місяцями, бачимо, що існують певні відмінності: для осінньо-зимового періоду характерна сильніша варіографія, ніж для весняно-літнього. Про це свідчать зменшення частки квадратичної моделі та наявність ступеневої серед оптимальних моделей для даних за жовтень і січень, тоді як для весняно-літнього періоду частіше підходять моделі, що вказують на зменшення залежності даних у разі зростання відстані між точками. Проте різниця незначна, тому автори рекомендують за крігінг-інтерполяції використовувати перевірку на оптимальність серед моделей (3) – (5).

Тиск

Результати визначення варіографічної моделі для крігінг-інтерполяції даних прогнозу моделі COSMO за тиском під час обробки даних наведено в табл. 2. Бачимо, що для крігінг-інтерполяції прогностичних даних поля тиску (як і для температури) немає однієї оптимальної моделі варіо-

Таблиця 1

Представлення оптимальності моделей (1) – (10) для даних прогнозу моделі COSMO за температурою у відсотковому співвідношенні до кількості оброблених наборів даних (100 %)

Модель		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Квітень 2013 р.	ϵ	-	-	12,76	23,4	12,77	51,07	-	-	-	-
	σ	-	-	14,9	8,51	17,02	42,55	-	17,02	-	-
Липень 2013 р.	ϵ	-	-	18,18	18,18	20,45	43,19	-	-	-	-
	σ	-	-	43,19	-	13,64	34,09	-	9,08	-	-
Жовтень 2013 р.	ϵ	-	-	-	48,58	20	20	-	-	-	11,42
	σ	-	-	11,43	34,29	20	34,28	-	-	-	-
Січень 2014 р.	ϵ	-	-	12,77	27,66	34,04	8,51	-	-	-	17,02
	σ	-	-	23,4	29,79	31,92	14,89	-	-	-	-
Усі дані	ϵ	-	-	10,93	29,45	21,82	30,7	-	-	-	7,11
	σ	-	-	23,23	18,15	20,65	31,45	-	6,52	-	-

Таблиця 2

Представлення оптимальності моделей (1) – (10) для даних прогнозу моделі COSMO за тиском у відсотковому співвідношенні до кількості оброблених наборів даних (100 %)

Модель		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Квітень 2013 р.	ϵ	-	-	-	45,1	27,45	27,45	-	-	-	-
	σ	-	-	-	17,65	11,76	37,35	-	9,7	23,54	-
Липень 2013 р.	ϵ	-	-	-	27,27	13,64	18,18	13,64	-	27,27	-
	σ	-	-	-	44,19	-	-	23,26	-	32,55	-
Жовтень 2013 р.	ϵ	-	-	-	28,58	-	37,14	-	17,14	17,14	-
	σ	-	-	-	20,0	-	28,57	11,43	22,58	17,14	-
Січень 2014 р.	ϵ	-	-	7,84	49,02	19,61	15,69	7,84	-	-	-
	σ	-	-	17,6	27,45	9,8	25,5	9,8	9,8	-	-
Усі дані	ϵ	-	-	1,96	38	15,18	24,62	5,37	4,35	11,17	-
	σ	-	-	4,41	27,33	5,40	22,85	11,12	10,52	18,37	-

графії. Із результатів експерименту випливає, що динаміка атмосферної циркуляції призводить до активнішої зміни кореляційної структури поля тиску, ніж поля температури.

Значною мірою ця структура описується гаусівською, квадратичною, лінійною та логарифмічною моделями. Проте для деякої частини даних оптимальними є також експоненціальна, кубічна модель і модель нагет-ефект.

Для крігінг-інтерполяції поля тиску на сітку метеостанцій України рекомендовано підбирати оптимальну модель серед моделей (3) – (9), що дасть можливість максимально покращити точність інтерполяції.

Опади

Результати визначення варіографічної моделі для крігінг-інтерполяції даних прогнозу моделі COSMO за опадами під час обробки даних приведено в табл. 3. Варіографічний аналіз для даних прогнозу опадів є більш однозначний, ніж для даних прогнозу температури і тиску. Очевидною є перевага моделі нагет-ефект, що фактично означає відсутність залежності між даними по території України. Проте оптимальність інших моделей для певної кількості спостережень свідчить про глобальні явища, відповідальні за опади на всій розрахунковій області, що забезпечують певну залежність між даними. Причому у весняно-літній період залежність між даними сильніша, про що свідчить оптимальність степеневі моделі. Для даних за жовтень і січень наявна оптимальність сферичної та кругової моделі, що вказує на існування залежності лише на певній відстані.

Згідно з результатами варіографічного дослідження, для крігінг-інтерполяції даних за опадами автори рекомендують використовувати модель нагет-ефект, а також застосовувати перевірку сферичної, гаусівської та степеневі

моделей для проведення оптимальної крігінг-інтерполяції.

Висновки

Використання оптимальних моделей дозволить отримати точнішу оцінку метеопараметрів у разі використання методу крігінга для інтерполяції прогнозу COSMO на сітку метеостанцій України.

Автори запропонували визначити оптимальну модель для кожного метеопараметра методом підбору найпоширеніших для крігінга моделей до даних прогнозу. Цей метод є експериментальним, тому для достовірності його результату було взято вибірку даних за рік із часовим кроком 3 години. Експеримент проведено для температури, тиску та опадів, оскільки ці метеопараметри є важливими складовими прогнозу. Таким способом можна визначити оптимальні варіографічні моделі й для інших метеопараметрів, які прогноуються за допомогою COSMO.

Жоден із метеопараметрів, які розглядаються, не підпорядковується одній моделі. Проте існує певна вибірка моделей, що досягають оптимальності за даними прогнозу певного метеопараметра. Для температури – це експоненціальна, гаусівська, лінійна та квадратична моделі. Для опадів – модель нагет-ефект, сферична, гаусівська та степеневі моделі. Для тиску не підходять кругова, сферична та степеневі моделі. Показано, що для досягнення мінімальної похибки інтерполяції необхідно вибирати модель із найменшою максимальною похибкою серед визначених перед кожною реалізацією крігінга. Це призведе до збільшення машинного часу інтерполяції даних, проте дасть можливість виграти точність, що є основним пріоритетом для прогнозу погоди. Також важливим результатом є те, що модель буде обиратися не серед 10 моделей,

Таблиця 3

Представлення оптимальності моделей (1) – (10) для даних прогнозу моделі COSMO за опадами у відсотковому співвідношенні до кількості оброблених наборів даних (100 %)

Модель		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Квітень 2013 р.	ϵ	-	-	-	-	-	-	-	61,70	-	38,3
	σ	-	-	-	8,51	-	-	-	61,70	-	29,79
Липень 2013 р.	ϵ	-	-	-	9,09	-	-	-	77,27	-	13,64
	σ	-	13,64	-	-	13,64	-	-	72,72	-	-
Жовтень 2013 р.	ϵ	-	-	-	-	-	-	-	60	-	40
	σ	-	31,42	-	22,87	-	-	-	45,71	-	-
Січень 2014 р.	ϵ	-	27,45	-	13,72	-	7,84	-	50,99	-	-
	σ	8,50	27,66	-	17,03	-	-	-	46,81	-	-
Усі дані	ϵ	-	6,87	-	5,7	-	1,96	-	62,49	-	22,98
	σ	2,13	18,18	-	12,1	3,41	-	-	56,74	-	7,44

а лише серед визначеної вибірки, що економить час виконання інтерполяції.

* *

1. Кацалова Л.М., Шпиг В.М. Крігінг-інтерполяція в задачах прогнозу погоди // Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2013. – Вип. 264. – С. 3-9.
2. Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Савельева Е.А., Чернов С.Ю., Тимонин В.А. Элементарное введение в геостатистику // ВИНТИ. Серия “Проблемы окружающей среды и природных ресурсов”. – М. – 1999. – № 11. – 135 с.
3. McBratney A.B. and Webster R. Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates // Journal of Soil Science. – 1986. – Vol. 37. – P. 617-639.
4. Справка ArcGIS 10.1: <http://resources.arcgis.com>.
5. <http://www.dvseisgeo.ru/Methodics/GeoModel-9-91.htm>.
6. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
7. Кошель С.М., Мусин О.Р. Методы цифрового моделирования: кригинг и радиальная интерполяция // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. – 2000. – №4(26)-№5(27). – С. 32-33.

Український гідрометеорологічний інститут, Київ

Л.Н. Кацалова, В.М. Шпиг

Вариографические модели распределения метеовеличин на территории Украины для кригинг-интерполяции

В статье описано понятие вариографии и представлены наиболее распространённые вариографические модели. Предложен алгоритм определения оптимальной модели для интерполяции данных прогноза метеорологических величин методом кригинга. Определены оптимальные модели для кригинг-интерполяции полей температуры, давления и осадков, которые получены с помощью модели COSMO для территории Украины.

Ключевые слова: вариография, экспериментальная вариограмма, вариографическая модель, интерполяция, метод кригинга.

L.M. Katsalova, V.M. Shpyg

Variographic models of meteorological parameters distribution on the territory of Ukraine for kriging-interpolation

In this paper describes the concept of the variography and presented the most spread variographic models. The algorithm of determining of the optimal model for further interpolation of forecasting meteorological data by kriging is proposed. Here are shown the optimal models for the kriging-interpolation of temperature, pressure, and precipitation fields, which are obtained by using COSMO model for Ukraine.

Keywords: variography, experimental variogram, variographic model, interpolation, kriging.

УДК 551.509.6;551.577.2

С.В. Носар, Є.А. Степура

МОЖЛИВІСТЬ ШТУЧНОГО ЗБІЛЬШЕННЯ ЗИМОВИХ ОПАДІВ У ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОМУ ПРИЧОРНОМОР'І (НА ПРИКЛАДІ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Досліджені ресурси хмар сезону робіт (тривалістю з 01 листопада по 31 березня) у Північно-Західному Причорномор'ї (Миколаївська область) за тридцятирічний період (з 01.11.1980 по 31.03.2010 року). Показано, що за умови використання для штучних впливів усіх хмар (100%), з яких випадають природні опади, можливе збільшення суми опадів за сезон проведення робіт (5 місяців) може скласти від 47,3 мм на півдні області до 72,7 мм на північному заході області, що складає від 32% до 41% суми природних опадів за цей же період.

Ключові слова: нестача природних опадів, ресурси хмар, штучні впливи на зимові хмари, Миколаївська область, можлива кількість додаткових опадів.

Вступ

Південні регіони України відомі своїми чорноземами, що є одними з найродючіших ґрунтів світу. Але головною проблемою, яка заважає оптимальній вегетації рослин і стримує отримання стабільно високих урожаїв сільськогосподар-

ських культур, є недостатня кількість природних опадів. Зважаючи на цей чинник, можливість одержати і накопичити додаткову вологу завдяки проведенню штучних впливів на хмари поряд із традиційним зрошуванням у сільському господарстві, яке використовує недостатній тут