

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

Л.М. Кацалова, В.М. Шпиг

ВИБІР ВАРІОГРАФІЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ДАНИХ ПРОГНОЗУ ТИСКУ, ТЕМПЕРАТУРИ ТА ОПАДІВ

Обґрунтовано критерій вибору варіографічних моделей для крігінг-інтерполяції даних прогнозу моделі COSMO. Уведено поняття оптимальної та квазіоптимальної моделей. Представлено результати експериментального визначення оптимальних та квазіоптимальних варіографічних моделей для даних прогнозу приземних тиску, температури та кількості опадів моделі COSMO за період з квітня 2013 р. по березень 2014 р. Проведено аналіз отриманих результатів та зроблено висновки, що мають практичну цінність для постмодельної обробки прогнозу для території України.

Ключові слова: прогноз метеопараметрів, крігінг-інтерполяція, варіографія, експериментальна варіограма, варіографічна модель.

Вступ

Використання математичних моделей для отримання прогнозу погоди давно увійшло у світову практику [1, 2, 3]. Проте існує досить небагато глобальних моделей, які описують процеси, що відбуваються в атмосфері й використовуються в прогнозуванні погоди. Розробка, впровадження та підтримка роботи таких моделей потребують значних інтелектуальних та матеріальних ресурсів. Такого класу моделі є, зокрема, у США, Японії, Великобританії та Німеччині. Більшість країн світу використовують дані цих моделей для уточнення й удосконалення своїх власних прогнозів. В УкрГМІ для різних цілей експлуатуються такі мезомасштабні моделі прогнозу погоди як WRF [4] та COSMO [5].

Практика показала, що робота цих моделей не враховує повною мірою особливості підстильної поверхні, що, передусім, призводить до неточностей прогнозу погоди. Для коригування цих неточностей необхідно проводити постмодельну обробку прогностичних даних моделей та адаптацію їх до особливостей території України. Крім того, чисельні мезомасштабні моделі прогнозу погоди дають значення метеовеличин на певній сітці, що не збігається з сіткою метеостанцій України. Це ускладнює роботу по верифікації прогнозів і потребує застосування методів інтерполяції.

Інтерполяція – спосіб отримання проміжних значень величини за наявним дискретним набором відомих значень [6]. Існує багато методів інтерполяції, проте їх ефективність значною мірою залежить від поставленої задачі та вхідних даних. Один з використовуваних методів інтерполяції –

крігінг [7, 8]. Цей метод оптимізує процедуру інтерполяції на основі статистичної природи поверхні. Крігінг подібний до інтерполяції зважених відстаней [9], він визначає вагу навколишніх вимірних вузлів для визначення шуканого значення в невимірній точці. Вузли, що знаходяться ближче до оцінюваної точки, мають більший вплив. Але визначення ваги навколишніх вузлів у методі крігінга ускладнено порівняно з методом зважених відстаней. У звичайному крігінгу все залежить від моделі варіограми й просторового розподілу вимірних вузлів навколо оцінюваної точки.

Мета роботи – обґрунтувати критерій вибору варіографічних моделей для крігінг-інтерполяції даних прогнозу чисельної моделі.

Значення варіографічної моделі для крігінг-інтерполяції

Величину помилки інтерполяції даних методом крігінга обумовлюють кілька складових [10]:

1) Помилка вимірювання даних (помилка вхідних даних) не може не впливати на результат інтерполяції. Ця похибка є незмінна, і зрозуміло, що похибка результату буде не меншою, ніж похибка вхідних даних.

Для випадку інтерполяції даних моделі COSMO: якщо вхідні дані мають похибку щодо реальних даних, то й результат інтерполяції цих даних крігінгом буде мати не меншу похибку.

2) Похибка машинного обрахунку – похибка округлення. У ході реалізації крігінга виникає необхідність обертати матрицю, що потребує виконання значного числа операцій. Оскільки дані подаються в програмі не точно, а з певним округ-

гненням, то й результати операцій над даними будуть отримуватися з певною похибкою. Чим більша матриця, тим більше операцій треба виконати, тим більшою буде похибка округлення. Саме тому доцільно використовувати блочний крігінг, що дозволяє зменшити цю похибку.

3) Похибка методу. Метод крігінга базується на припущеннях незмішуваності оцінки й мінімізації її дисперсії, що дає можливість отримати оптимально точну інтерполяцію за точної варіограми (коли теоретична варіограма точно описує розподіл експериментальних даних). Тому похибка крігінга, по суті, є похибкою варіограми, що використовується крігінгом. Чим точніше варіограма описує розподіл вхідних даних, тим менша похибка інтерполяції. Саме тому питання

підбору варіограмної моделі дуже важливе під час використання крігінга.

У роботі [11] представлено результати застосування крігінг-інтерполяції до прогностичних даних моделі COSMO по тиску, температурі та опадах. Представлені результати виявилися цілком задовільними, такими, що не поступають точністю білінійній інтерполяції [12], хоча в методі крігінга використовувалась лише лінійна модель.

У роботі [14] прогноз проведено з використанням 10 моделей: 0 – лінійна, 1 – експоненційна, 2 – гаусівська, 3 – сферична, 4 – квадратична, 5 – нагет-ефект, 6 – кубічна, 7 – логарифмічна, 8 – степенева, 9 – кругова.

На рис. 1-3 приведено результати оцінки похибок (помилки) інтерполяції прогнозу COSMO

з вузлів регулярної (модель) сітки до точок нерегулярної сітки (метеорологічні станції України) для температури, тиску та добових сум опадів, виконаної методом крігінгу на основі моделей, що мають найменше й найбільше середньоквадратичне відхилення варіографії. Оцінку похибок виконано за принципом базового підходу верифікації чисельних прогнозів погоди шляхом порівняння різниці

Рис. 1. Розподіл похибок для кругової (білий колір) та степеневих моделей (чорний колір) на території України для температури повітря

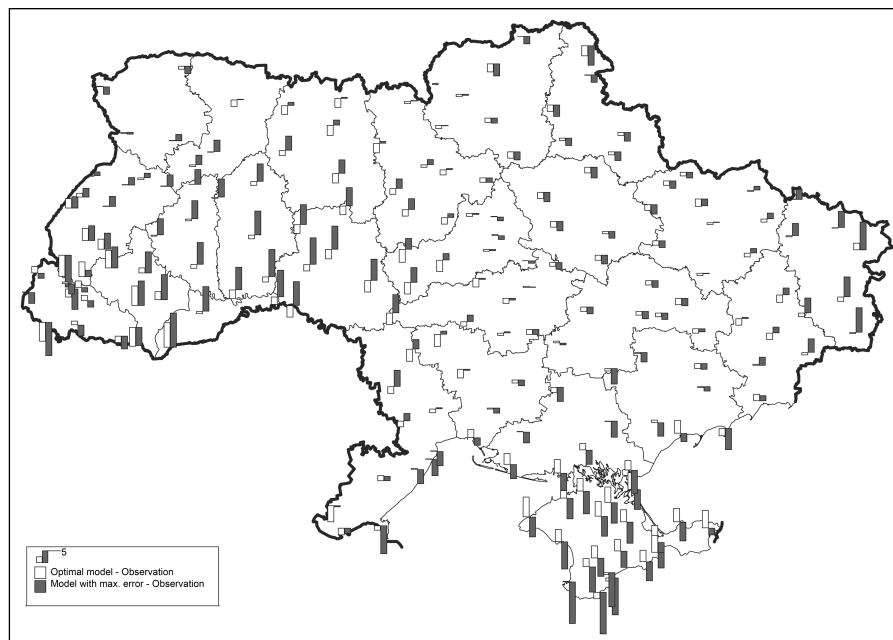


Рис. 2. Розподіл похибок для кругової (білий колір) та степеневих моделей (сірий колір) на території України для приведеного тиску

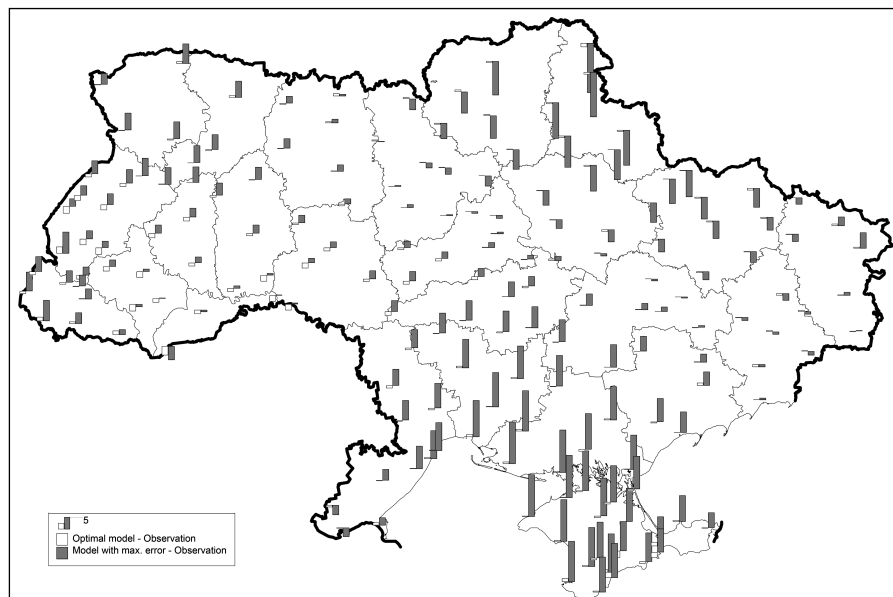
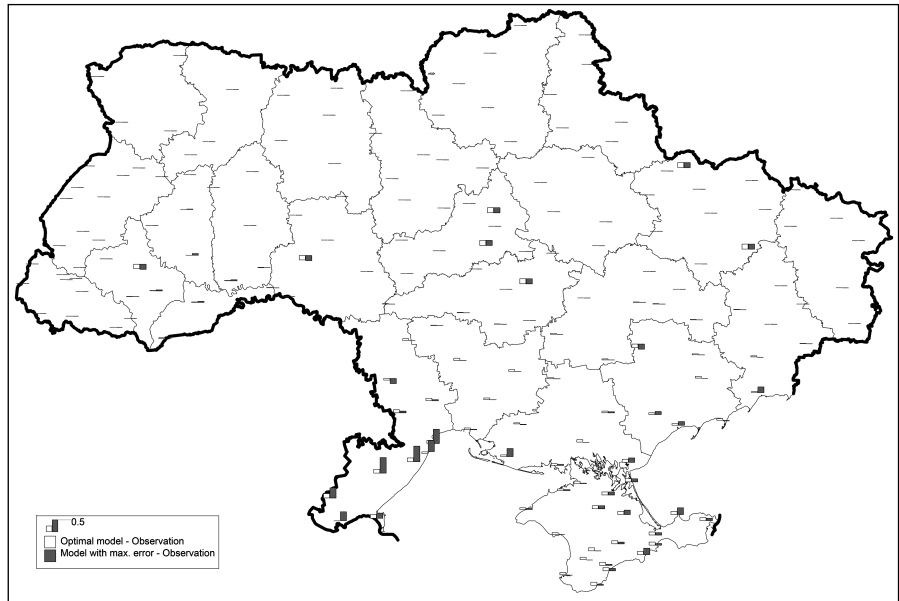


Рис. 3. Розподіл похибок для кругової (білий колір) та степеневих моделей (сірий колір) на території України для добової суми опадів



“модель – спостереження”. Таким чином, для метеостанцій, де використання варіографічних моделей супроводжується завищенням значень метеорологічної величини (метеопараметра) у порівнянні з даними спостережень, ця різниця буде додатною й елементи стовпчастої діаграми будуть спрямовані догори від основи діаграми, а в разі заниження, різниця буде від’ємною й елементи стовпчастої діаграми будуть спрямовані донизу.

У ході чисельних експериментів було отримано, що використання крігінгу, незалежно від варіограми, супроводжується як завищенням, так і заниженням інтерпольованих значень, тобто для жодної із моделей характер помилок не є односторонньо спрямованим по всій території України. Для температури, тиску та опадів є певна географічна локалізація похибок крігінг-інтерполяції із найбільшими їх значеннями на заході, північному заході, північному сході та півдні України. Порівняно великі їх значення були характерні для метеостанцій, розташованих у гірських та прибережних районах.

Значення похибок для моделі з найменшим середньоквадратичним відхиленням варіографії для температури й опадів не перевищували допустимих відхилень, наведених у [13]. Варто також відзначити, що в ході використання в крігінг-інтерполяції можуть бути отримані нефізичні оцінки (значення) атмосферних опадів. Для моделі з найменшим середньоквадратичним відхиленням варіографії такого ефекту помічено не було, проте треба мати на увазі, що його наявність зовсім відкидати не можна. Для практичних цілей необхідно використовувати своєрідні “запобіжники”, контроль значень на фізичність.

Очевидно, можливе покращення точності інтерполяції під час використання варіограмних моделей, що точніше описують розподіл вхідних даних. Попередні результати визначення найкращої моделі для даних прогнозу по тиску, температурі та опадах представлено в [14]. Дослідження проводилося експериментальним шляхом, на основі даних прогнозу моделі COSMO. Роботу з

визначення точності різних варіографічних моделей продовжено на більших вибірках даних.

Оптимальність та квазіоптимальність варіографічних моделей

Велике значення в точності крігінга відіграє варіографічна модель, що відображає зміну залежності значень параметра в точках від відстані між ними. Варіографічна модель будується на основі експериментальної варіограми, яка будується на основі вхідних даних [15, 16].

Дані прогнозу COSMO по кожному метеопараметру подаються на сітці $101 \times 209 = N$ вузлів з просторовим кроком по широті та довготі 0.125° . Сітка покриває область від 42.5° до 55° пн.ш. та від 17° до 43° сх.д., а отже максимальна відстань між двома точками складатиме 28.85° . Експериментальна варіограма розраховується за формулою:

$$\gamma(\rho) = \frac{\sum ((v(x_i) - v(x_j))^2)}{K}, \quad (1)$$

де для всіх $i, j = \overline{1, N} : |x_i - x_j| = \rho$, K – кількість пар вхідних точок, відстань між якими дорівнює ρ .

Для даних прогнозу COSMO кількість пар експериментальної варіограми $(\rho, \gamma(\rho)) = 10972$. Зрозуміло, що побудова теоретичної моделі з урахуванням такої кількості точок є надзвичайно складною й ресурсозатратною задачею. Також велика кількість точок може призвести до збільшення похибки варіографії. Саме тому для задачі інтерполяції даних прогнозу метеопараметрів моделі COSMO цілком обґрунтована необхідність побудови згладженої експериментальної

варіограми [16], рис. 4. Лаг для згладженої експериментальної варіограми оберемо рівним просторовому кроку $h = 0.125^\circ$.

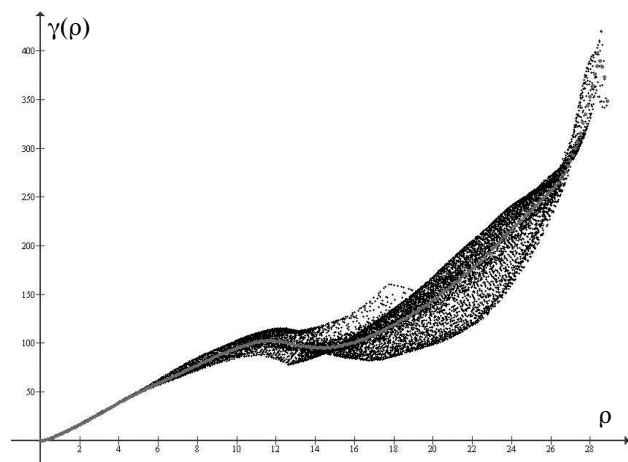


Рис 4. Експериментальна варіограма та згладжена експериментальна варіограма для даних прогнозу COSMO за 1 лютого 2014 р. на 00 год

Очевидно, що побудова згладженої експериментальної варіограми дає можливість значно спростити процедуру визначення коефіцієнтів теоретичної моделі і зменшити похибку варіографії, що виникає через велику кількість вузлів експериментальної варіограми.

За згладженою експериментальною варіограмою будуюмо 10 теоретичних моделей, описаних у [14]. Серед цих моделей треба обрати ту модель, яка найкраще відображає кореляційну структуру даних.

У ході вибору моделі необхідно встановити критерій оптимальності, тобто визначити показник, за яким одна модель буде кращою за інші. Природнім видається у виборі моделі керуватися певним відхиленням теоретичних моделей від експериментальної варіограми. Визначення

абсолютної $\varepsilon = \max_{i=1, N} |y(h_i) - \gamma(h_i)|$ і середньоквад-

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

є поширеною практикою і видається цілком виправданими під час визначення кращої моделі. Проте чисельний експеримент у [11] показав, що моделі, які дають найменшу середньоквадратичну похибку σ і найменшу абсолютну похибку ε на тому самому наборі вхідних даних, як правило, є різними. Це обумовлено наявністю значень варіограми, що сильно відхиляються від загального тренду, але не можуть бути знехтувані як помилкові. Такі крайні значення дають велику максимальну похибку варіографічного моделювання, проте їх вплив зменшується завдяки згладженню в процесі інтерполяції методом крігінга. Середньоквадратична похибка дає краще уявлення про якість моделювання експериментальних даних теоретичною функцією і її вплив на якість інтерполяції. Такий висновок підтверджує чисельний експеримент, що встановлює залежність між найменшими абсолютною та середньоквадратичною похибками варіографії та крігінг-інтерполяції. Результати експерименту частково представлено в табл. 1.

Варто звернути увагу, що середньоквадратичні похибки інтерполяції і варіографії не є зіставними. Якщо σ інтерполяції визначається на значеннях метеорологічних величин з діапазоном зміни $[-a, a]$, то σ варіографії визначається на значеннях експериментальної варіограми, діапазон зміни яких є $[0, 2a^2]$. Як правило, для температури та тиску середньоквадратична похибка варіографії буде більшою ніж середньоквадратична похибка крігінг-інтерполяції, а для кількості опадів – навпаки.

Дані експерименту показують, що наймен-

Таблиця 1

Мінімальні абсолютне ε_{var} та середньоквадратичне σ_{var} відхилення між експериментальною та теоретичною варіограмами, мінімальні абсолютне ε_{kr} та середньоквадратичне σ_{kr} відхилення між результатами крігінг-інтерполяції даних прогнозу COSMO та даними спостережень за температурою за 8.04. 2012 р. Моделі, на яких отримано відповідні мінімальні відхилення

Час	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00
ε_{var} , № моделі	3,0654 1	6,2571 2	10,6992 5	12,2096 5	8,3667 2	4,1142 2	5,7718 2
ε_{kr} , № моделі	7,4655 4	6,1451 4	9,1836 4	17,4249 5	13,0362 4	11,3223 4	10,8116 4
σ_{var} , № моделі	1,4348 1	2,9541 0	6,0682 5	6,7354 0	3,3970 0	2,8939 2	3,2002 2
σ_{kr} , № моделі	1,7875 1	1,7868 0	2,4779 5	2,9756 0	2,5154 0	1,9749 2	2,0331 2

ша середньоквадратична похибка між даними крігінг-інтерполяції та даними спостережень досягається на варіографічних моделях, що мають найменше середньоквадратичне відхилення від чисельної варіограми. Щодо абсолютної похибки, то таке твердження невірне.

Керуючись цими міркуваннями, уведемо наступне визначення.

Визначення 1. Оптимальною на наборі даних варіографічною моделлю серед моделей 1 – 10 будемо вважати ту модель, середньоквадратичне відхилення якої від експериментальної варіограми – найменше.

Мінімальне на наборі даних середньоквадратичне відхилення теоретичної варіограми від експериментальної будемо позначати σ_{opt} , середньоквадратичну похибку крігінг-інтерполяції, проведеної на основі оптимальної моделі, будемо позначати $\sigma_{kr\ opt}$.

Із табл. 1 видно, що на трьох наборах даних оптимальною є лінійна модель. У табл. 2 наведено середньоквадратичні похибки, які дає лінійна модель на інших наборах даних за 8 квітня 2012 р., різниці між найменшими середньоквадратичними похибками та похибками варіографії та крігінг-інтерполяції на основі лінійної моделі.

Із табл. 2 бачимо, що середньоквадратичне відхилення лінійної варіограми від експериментальної незначно відрізняється від мінімального на тих наборах даних, де σ_{opt} було отримано іншою варіографічною моделлю. Ще менше відрізняються між собою σ_{kr0} та $\sigma_{kr\ opt}$. Спостерігається така залежність: чим менша різниця між σ_{opt} та σ_{mod0} лінійної варіограми $|\sigma_{mod0} - \sigma_{opt}|$, тим менша різниця між крігінг-інтерполяцією на основі оптимальної та лінійної моделей.

Нехай $f(\sigma_{opt}) = a \cdot \sigma_{opt} + b$ – лінійна функція, що моделює зміну середньоквадратичної похибки крігінг-інтерполяції від зміни середньоквадратичної похибки варіографії за добу, f будується на основі експериментальних даних (рис. 5), f_{max} – максимальна середньоквадратич-

на похибка крігінг-інтерполяції на основі оптимальної моделі за вказаний період. Визначимо, на скільки може змінюватися величина σ_{opt} , щоб величина $f(\sigma_{opt} + \Delta \sigma_{opt}) \leq f_{max}$. Нехай $\Delta \sigma_{opt} = c \cdot \sigma_{opt}$, де $c > 0$ – деяка стала. Тоді:

$$f(\sigma_{opt} + \Delta \sigma_{opt}) = a \sigma_{opt} + a \cdot c \cdot \sigma_{opt} + b \leq f_{max} \Rightarrow c \leq \frac{f_{max} - b}{a \sigma_{opt}} - 1.$$

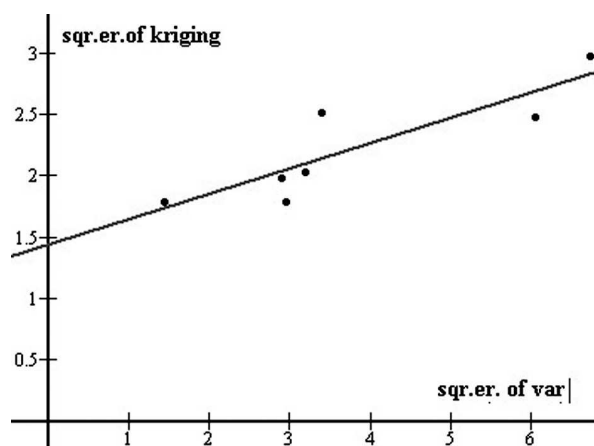


Рис. 5. Значення середньоквадратичних похибок варіографії та крігінг-інтерполяції даних прогнозу COSMO за 8.04. 2012 р. по температурі ($^{\circ}\text{C}$), функція $f(x) = 0.21x + 1.44$, що моделює залежність між ними

Стала c визначається експериментально за формулою:

$$c = \frac{f_{max} - b}{a \cdot \text{average}(\sigma_{opt})} - 1, \quad (2)$$

де $\text{average}(\sigma_{opt})$ – середнє мінімальних середньоквадратичних похибок варіографії за добу.

Уведемо наступне визначення.

Визначення 2. Модель, середньоквадратичне відхилення якої від експериментальної варіограми належить околу $|\sigma_{opt}, \sigma_{opt} + c \cdot \sigma_{opt}|$, де $c > 0$ – будемо називати квазіоптимальною варіографічною моделлю.

Таблиця 2

Середньоквадратичне відхилення між експериментальною та лінійною варіограмами σ_{mod0} , середньоквадратичне відхилення σ_{kr0} між результатами крігінг-інтерполяції на основі лінійної моделі даних прогнозу COSMO та даними спостережень за температурою за 8.04. 2012 р.

	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00
σ_{mod0}	1,7028	2,9541	7,5292	6,7354	3,3970	3,5020	3,5887
σ_{kr0}	1,7876	1,7868	2,4790	2,9756	2,5154	1,9751	2,0332
$ \sigma_{mod0} - \sigma_{opt} $ % від σ_{opt}	0,268 18,68%	0	0,461 24,08%	0	0	0,6081 21,01%	0,3885 12,14%
$ \sigma_{kr0} - \sigma_{kr\ opt} $	0,0001	0	0,0003	0	0	0,0002	0,0001

Зрозуміло, що значення c для температури, опадів та приземного тиску буде відрізнятися. За прогнозом та даними спостережень за сьоме, восьме та дев'яте квітня 2014 р. визначено, що для температури $c = 0,3$, для тиску $c = 0,9$, для опадів $c = 0,1$.

Із табл. 2 бачимо, що квазіоптимальною для даних прогнозу температури моделі COSMO за 8.04. 2012 є лінійна модель. Середньоквадратична похибка крігінг-інтерполяції на основі цієї моделі є малою, її величина попадає в 30 % окіл похибок, отриманих на основі оптимальних моделей на відповідних наборах даних.

Результати дослідження

Для визначення оптимальних та квазіоптимальних варіографічних моделей обчислено середньоквадратичні похибки варіографії моделей (1)-(10) на всіх наборах даних прогнозу COSMO за квітень 2013 р. – березень 2014 р. Такий масив даних видається авторам достатнім для визначення та моделювання кореляційної структури прогностичних даних протягом року.

Температура

У табл. 3 показано відсоткову частку наборів даних, на яких кожна з десяти теоретичних моделей є оптимальною та квазіоптимальною (у дужках). Тоді, коли модель не є оптимальною на

жодному наборі даних за вказаний місяць, у таблиці залишається пуста клітинка.

Із табл. 3 видно, що в холодну половину року (жовтень - березень) на більшості наборів даних прогнозу температури є оптимальною кругова модель. Ця ж модель є квазіоптимальною на всіх наборах даних за вказаний період. Щодо теплої половини року (квітень - вересень), то все не так однозначно. Як і в холодний період року, у квітні - вересні 2013 р. кругова модель є оптимальною на більшості наборів даних, проте вона вже не є квазіоптимальною на всіх наборах за теплий період. Натомість, квазіоптимальною на всіх наборах даних у травні, липні та серпні є степенева модель. У квітні та червні жодна з десяти моделей не є квазіоптимальною на всіх наборах. Щоб визначити моделі, на основі яких найкраще проводити крігінг-інтерполяцію в ці місяці, побудовано такі діаграми: значення середньої за місяць σ для всіх моделей (рис. 6а, 7а), графіки квазіоптимальності для моделей, що є оптимальними в квітні та червні по кожному набору (рис. 6б, 7б).

Найменші середні похибки в квітні дають кругова та степенева моделі. З рис. 6б видно, що лише ці дві моделі разом дають квазіоптимальність на всіх наборах даних за квітень. Аналогічні висновки дійсні і для даних за червень.

Таблиця 3

Результати визначення оптимальних та квазіоптимальних моделей по даних прогнозу температури моделі COSMO за період з квітня 2013 р. по березень 2014 р.

№ моделі	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Квітень 2013		6,7% (80%)			30% (80%)				10% (83,3%)	53,3% (93,3%)
Травень 2013		16,7% (93,3%)			13,4% (86,7%)		13,3% (83,3%)	13,4% (86,7%)	16,7% (100%)	26,5% (63,3%)
Червень 2013		14,3% (92,9%)			10,7% (85,7%)		32,1% (82,1%)		14,3% (92,9%)	28,6% (53,6%)
Липень 2013					25,9% (85,2)		33,3% (85,2%)		7,4% (100%)	33,4% (66,7%)
Серпень 2013					21,4% (50%)		7,1% (50%)			71,5% (100%)
Вересень 2013					17,2% (100%)				6,9% (100%)	75,9% (96,5%)
Жовтень 2013		5% (65%)			10% (55%)					85% (100%)
Листопад 2013		13,3% (96,7%)			26,7% (90%)					60% (100%)
Грудень 2013										100% (100%)
Січень 2014		7% (83,3%)			6,3% (73%)				10% (86,7%)	76,7% (100%)
Лютий 2014										100% (100%)
Березень 2014										100% (100%)

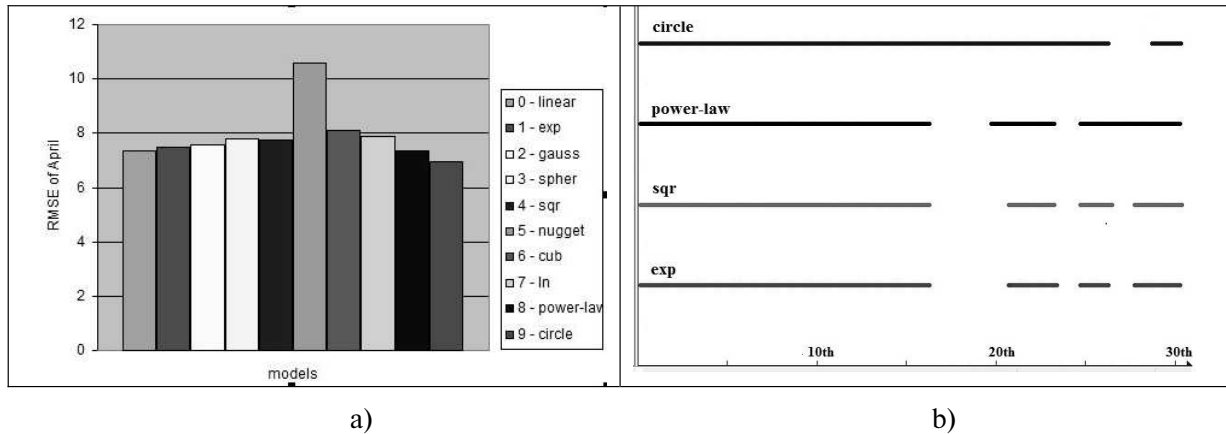


Рис. 6. Результати варіографії даних прогнозу приземної температури моделі COSMO за квітень 2013 р.: а) значення середньої за місяць середньоквадратичної похибки для всіх моделей; б) набори даних, на яких моделі, що є оптимальними в квітні, є квазіоптимальними

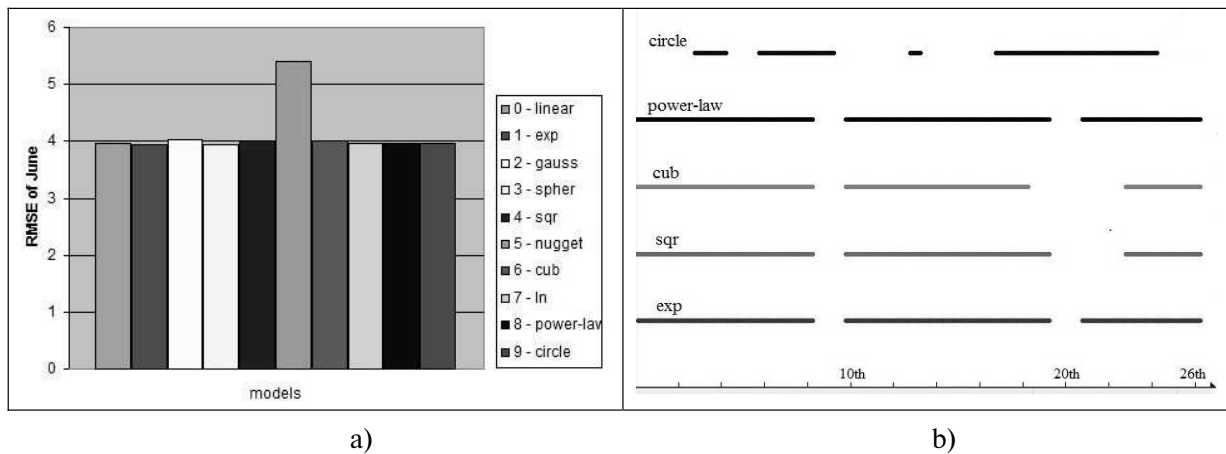


Рис. 7. Результати варіографії даних прогнозу приземної температури моделі COSMO за червень 2013 р.: а) значення середньої за місяць середньоквадратичної похибки для всіх моделей; б) набори даних, на яких моделі, що є оптимальними в червні, є квазіоптимальними

Отже, для крігінг-інтерполяції даних прогнозу приземної температури моделлю COSMO найкращою є кругова модель. Це означає, що існує певна область, в якій залежність між даними є суттєва. Така кореляція між даними характерна для атмосферних утворень, що охоплюють усю територію України або більшу її частину. Поза межами цієї області залежність між даними зникає. Незначна кореляція характерна для атмосферних утворень, які охоплюють (займають) лише частину території України (розрахункової області) або внутрімасових процесів. Для теплої половини року (квітень-вересень) необхідно визначити середньоквадратичні похибки кругової та степеневі моделі і проводити варіографію тією моделлю, похибка якої найменша. Степенева модель найкраще описує ті випадки, коли стійка залежність між даними спостерігається по всій розрахунковій області.

Тиск

У табл. 4 показано відсоткову частку наборів даних, на яких кожна з десяти теоретичних моделей є оптимальною та квазіоптимальною (у дужках) за місяць. Тут бачимо, що на більшості наборів даних за рік оптимальною є гаусівська модель, яка також є квазіоптимальною на 100 % даних у всі місяці, окрім липня та жовтня. У липні на 100 % наборах квазіоптимальною є логарифмічна модель, що також є квазіоптимальною на більшості даних за теплий період року (квітень - жовтень). Щоб визначити моделі, на основі яких найкраще проводити крігінг-інтерполяцію в жовтні, проведемо аналіз, аналогічний тому, що проводився для даних прогнозу температури.

Із рис. 8 видно, що найменшу середньоквадратичну похибку дає логарифмічна модель, проте є набори даних, на яких квазіоптимальною (оптимальною) є лише модель Гауса.

Таблиця 4

Результати визначення оптимальних та квазіоптимальних моделей за даними прогнозу приземного тиску моделі COSMO за період з квітня 2013 р. по березень 2014 р.

№ моделі	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Квітень 2013	16,67% (93,3%)		23,33% (100%)		33,33% (76,7%)			10% (100%)		16,67% (63%)
Травень 2013	10% (83%)		16,66% (100%)		26,67% (60%)		16,67% (63,3%)	10% (73,3%)		20% (63,3%)
Червень 2013	10,71% (100%)		14,28% (100%)		17,86% (93%)	7,14% (50%)	35,71% (93%)	7,16% (100%)		7,14% (64,3%)
Липень 2013			18,42% (80,5%)				33,33% (88,9%)	48,25% (100%)		
Серпень 2013			28,57% (100%)				42,86% (100%)	28,57% (100%)		
Вересень 2013	10,34%		20,69% (100%)		13,79% (79,3)		27,59% (79,3)	27,59% (93,1%)		
Жовтень 2013			30% (90%)		30% (85%)	15% (55%)	10% (85%)	15% (90%)		
Листопад 2013	16,67% (86,7%)		43,33% (100%)				20% (46,7%)			20% (50%)
Грудень 2013		13,3% (73%)	40% (100%)		10% (66,7%)		10% (76,7%)			26,67% (56,7%)
Січень 2014	13,33% (90%)	10% (83%)	33,33% (100%)		20% (66,7%)					23,33% (53,3%)
Лютий 2014	14,81% (81,5%)		70,38% (100%)							14,81% (51,9%)
Березень 2014			62,5% (100%)		6,25% (50%)			6,25% (62,5%)		25% (68,8%)

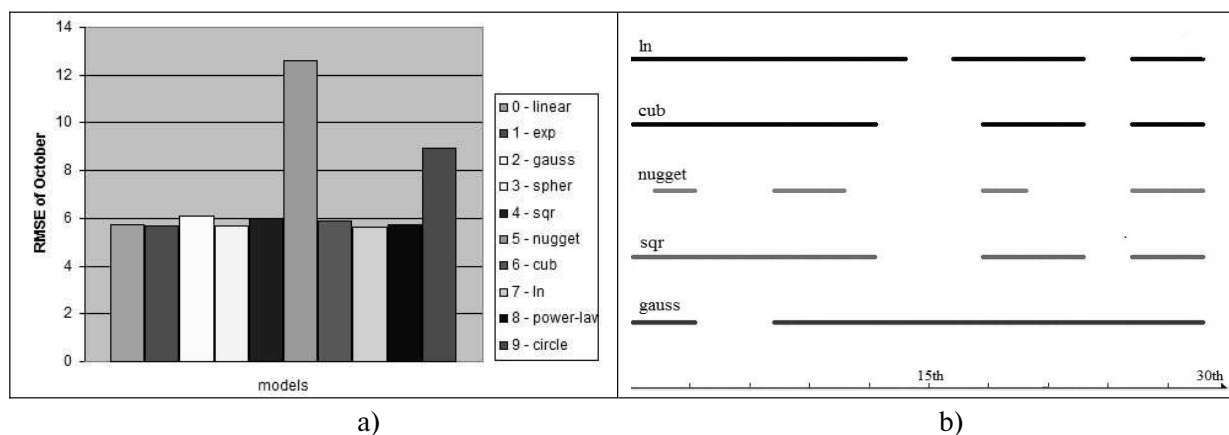


Рис. 8. Результати варіографії даних прогнозу приземного тиску моделі COSMO за жовтень 2013 р.: а) значення середньої за місяць середньоквадратичної похибки для всіх моделей; б) набори даних, на яких моделі, що є оптимальними в жовні, є квазіоптимальними

Отже, для крігінг-інтерполяції даних прогнозу приземного тиску моделлю COSMO найкращою є модель Гауса. Це означає, що залежність між даними існує на всій області, проте зменшується зі збільшенням відстані між точками. Для теплої половини року (квітень-жовтень) залежність між даними сильніша, про що свідчить збільшення наборів квазіоптимальності логарифмічної моделі в цей період. Таким чином, для крігінг-інтерполяції даних приземного тиску необхідно визначати середньоквадратичні

похибки гаусівської та логарифмічної моделей і проводити варіографію тією моделлю, похибка якої найменша.

Опаду

У табл. 5 показано відсоткову частку наборів даних, на яких кожна з десяти теоретичних моделей є оптимальною та квазіоптимальною (в дужках) за місяць. На більшості наборів даних за рік оптимальною є кругова модель, яка також є квазіоптимальною майже на 100 % даних за рік. Однозначно визначити модель неможливо за чер-

Таблиця 5

Результати визначення оптимальних та квазіоптимальних моделей за даними прогнозу опадів моделі COSMO за період з квітня 2013 р. по березень 2014 р.

№ моделі	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Квітень 2013			40% (93.3%)				3.3% (66.7%)	3.3% (80%)		53.4% (100%)
Травень 2013			30% (93.3%)			3.3% (50%)	6.7% (70%)	13.3% (80%)		46.7% (100%)
Червень 2013			28.6% (92.9%)				7.1% (46.4%)	10.7% (53.5%)		53.6% (85.7%)
Липень 2013			22.2% (100%)				11.1% (66.7%)	14.8% (77.8%)		51.9% (100%)
Серпень 2013			21.4% (100%)					21.4% (78.6%)		57.2% (85.7%)
Вересень 2013			24.1% (93.1%)				6.9% (75.9%)	10.4% (82.8%)		58.6% (100%)
Жовтень 2013			25% (95%)			5% (35%)	10% (65%)	5% (85%)		55% (100%)
Листопад 2013			30% (100%)			3.3% (53%)	26.7% (80%)			40% (100%)
Грудень 2013			23.3% (100%)				16.7% (73.3%)			60% (100%)
Січень 2014			20% (100%)				20% (56.7%)	6.7% (76.7%)		53.3% (100%)
Лютий 2014			33.3% (100%)				11.1% (55.5%)	3.7% (88.9%)		51.9% (89.5%)
Березень 2014			37.5% (100%)					25% (81.3%)		27.5% (100%)

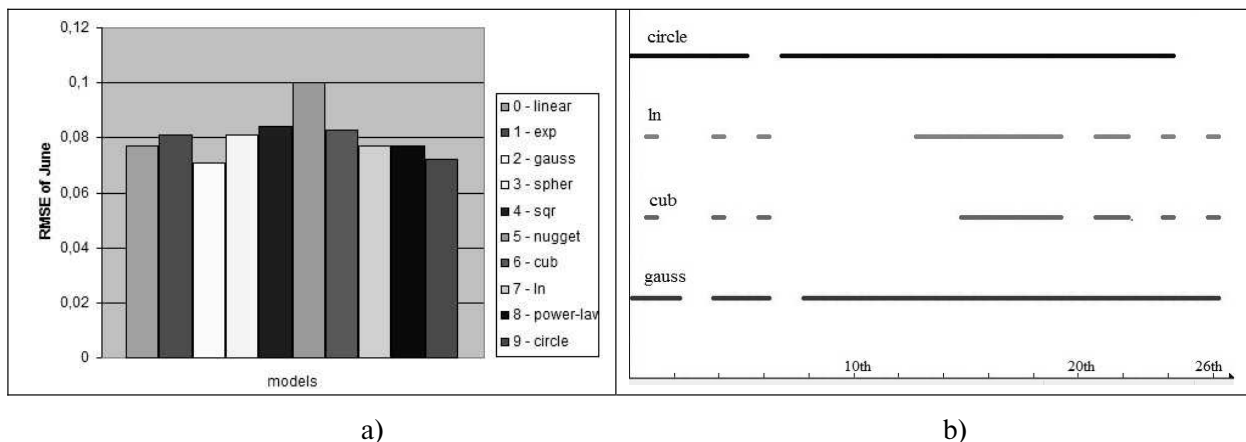


Рис. 9. Результати варіографії даних прогнозу кількості опадів моделі COSMO за червень 2013 р.: а) значення середньої за місяць середньоквадратичної похибки для всіх моделей; б) набори даних, на яких моделі, що є оптимальними в червні, є квазіоптимальними

вень, оскільки в цей місяць жодна модель не була квазіоптимальною на всіх наборах. Із рис. 9 бачимо, що проводити інтерполяцію для даних за цей місяць треба за допомогою кругової моделі або моделі Гауса, що є також квазіоптимальною на більшості даних за холодне півріччя (листопад – березень). Таким чином, крігінг-інтерполяцію даних прогнозу кількості опадів доцільно проводити на основі кругової та гаусівської моделей,

обираючи ту, середньоквадратична похибка якої найменша.

Отримані результати кількісно відрізняються від результатів отриманих у дослідженні [14]. Це пов'язано зі зменшенням кроку згладжування експериментальної варіограми, дослідження якого винесено в окрему роботу. Якісно ж результати визначення оптимальних моделей значимо не змінилися.

Висновки

На основі теоретичних міркувань та чисельного експерименту автори встановили критерій вибору варіографічних моделей для крігінг-інтерполяції даних прогнозу метеопараметрів моделлю COSMO. Згідно з установленим критерієм визначено поняття оптимальної та квазі-оптимальної моделей варіографії.

Результати експериментального визначення оптимальних та квазіоптимальних варіографічних моделей для даних прогнозу приземних тиску, температури та кількості опадів моделі COSMO за період з квітня 2013 р. по березень 2014 р. представлено в табл. 3-5 та на рис. 4-6.

Проведено аналіз отриманих результатів та зроблено такі висновки:

- Для крігінг-інтерполяції даних прогнозу температури найкраще підходить кругова модель, що є квазіоптимальною на більшості наборів даних за рік. Для збільшення точності в процесі інтерполяції методом крігінга даних по температурі варто проводити вибір серед кругової та степеневі моделі, керуючись середньоквадратичним відхиленням моделі від експериментальної варіограми, як критерієм вибору.
- Для крігінг-інтерполяції даних прогнозу тиску найкраще підходить модель Гауса. Проте в ході крігінг-інтерполяції варто проводити вибір між гаусівською та логарифмічною моделлю, що може покращити точність інтерполяції.
- Для крігінг-інтерполяції даних прогнозу кількості опадів найкраще підходять кругова та гаусівська моделі.

Результати дослідження буде використано в створенні програмних засобів інтерполяції прогностичних даних прогнозу моделі COSMO методом крігінга.

* *

1. Кибель И.А. Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды. — М.: Гостехиздат, 1957. — 375 с.
2. Марчук Г.И. Численные методы в прогнозе погоды. — Л.: Гидрометеоздат, 1967. — 353 с.
3. Прусов В.А., Дорошенко А.Ю. Моделирование природных и техногенных процессов в атмосфере. — К.: Наук. думка, 2006. — 542 с.
4. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Dale M. Barker, Michael G. Duda, Xiang-Yu Huang, Wei Wang, Jordan G. Powers. A Description of the Advanced Research WRF Version. 3 NCAR TECHNICAL NOTE. 2008. http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf
5. Doms G. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model: www.cosmo-model.org
6. Самарский А.А. Введение в численные методы. — М.: Наука, 1982.

7. 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.
8. Oliver M.A. Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems // International Journal of Geographic Information Systems. — 1990. — Vol. 4. — P. 313-332.
9. Зилинская Е. И. Методы интерполяции данных http://www.rusnauka.com/13_NMN_2011/Informatica/1_86467.doc.htm
10. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Консенова Н.В. Вычислительные методы для инженеров. — М.: Высшая школа, 1994. — 544 с.
11. Кацалова Л.М., Шпиг В.М. Крігінг-інтерполяція в задачах прогнозу погоди // Наук. пр. УкрНДГМІ. — 2013. — Вип. 264. — С. 3-8.
12. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. — М.: Наука, 1989.
13. Настанова по службі прогнозів та попереджень про небезпечні та стихійні явища погоди: КД. 52.4.3.01-03. — Офіц. вид. — К.: Держ. гідрометеорологічна служба, 2003. — 30 с.
14. Кацалова Л.М., Шпиг В.М. Варіографічні моделі розподілу метеовеличин на території України для крігінг-інтерполяції // Наук. пр. УкрНДГМІ. — 2014. — Вип. 266. — С. 20-25.
15. Алексанина М.Г. Исследование возможности применения метода вариограмм для анализа пространственной структуры спутниковых изображений NOAA/AVHRR атмосферы и поверхности океана. Вторая Открытая Всероссийская конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)”. Сб. научных статей. 2004. Том 1. С 71-73.
16. Демьянов В.В., Савельева Е. А. Геостатистика. Теория и практика. — М.: Наука, 2010. — 329 с.

Український гідрометеорологічний інститут, Київ

Кацалова Л.Н., Шпиг В.М.

Выбор вариографической модели для данных прогноза давления, температуры и осадков

Обоснован критерий выбора вариографических моделей для крігінг-інтерполяції даних прогноза моделі COSMO. Введены понятия оптимальной и квазиоптимальной моделей. Представлены результаты экспериментального определения оптимальных и квазиоптимальных вариографических моделей для данных прогноза приземного давления, температуры и количества осадков модели COSMO за период с апреля 2013 г. по март 2014 г. Проведен анализ полученных результатов и сделаны выводы, которые имеют практическое значение для постмодельной обработки прогноза для территории Украины.

Ключевые слова: прогноз метеопараметров, крігінг-інтерполяція, варіографія, експериментальна варіограма, варіографіческа модель.

Katsalova L.M., Shpyg V.M.

The choice of variographical model for the pressure, temperature and precipitation forecast data

In this paper the criteria choice is described for the variographical models for kriging interpolation of COSMO model data forecast. The concepts of optimal and quasi-optimal models are proposed. The results of the experimental evaluation of optimal and quasi-optimal variographical

models for the pressure, temperature and precipitation by COSMO model forecast for the period from April 2013 to March 2014. The obtained results and conclusions, that have practical significance for the post-processing of results of numerical weather prediction models for the territory of Ukraine, are discussed.

Keywords: kriging, interpolation, variography, experimental variogram.

УДК 551.509.6;551.577.2

С.В. Носар, Є.А. Степура

ОЦІНКА МОЖЛИВОГО ШТУЧНОГО ЗБІЛЬШЕННЯ ОПАДІВ У ПІВНІЧНОМУ ПРИЧОРНОМОР'І В ХОЛОДНУ ЧАСТИНУ РОКУ (НА ПРИКЛАДІ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Розглянуто ресурси хмар у сезон проведення робіт у Північному Причорномор'ї (Херсонська область) за тридцятирічний період (з 01.11.1980 по 31.03.2010 рр.). У результаті виконаних розрахунків показано, що штучні впливи на всі хмари, з яких у регіоні випадають природні опади, можуть збільшити суму опадів за сезон проведення робіт (з листопада по березень включно) на величину від 19,2 мм до 105,6 мм, а відносне збільшення опадів становитиме від 24 % до 77 % суми природних опадів за цей же період.

Ключові слова: дефіцит природних опадів, ресурси хмар, штучні впливи на зимові хмари, додаткові опади.

Створена й апробована в Україні в семидесяті роки ХХ ст. технологія інтенсифікації природних опадів холодної частини року показала, що відносне збільшення їх кількості, отримане завдяки штучному впливу на хмари, сягало 35-40 % від суми природних опадів за цей період та залежало від їх інтенсивності [1-4].

Опираючись на результати згаданої вище вітчизняної розробки, на підставі матеріалів метеорологічних спостережень за хмарністю та опадами в Миколаївській області, яка розташована в Північно-Західному Причорномор'ї, було досліджено ресурси хмар під час сезонів проведення робіт з інтенсифікації природних опадів [5]. Тривалість сезону проведення робіт – з 1 листопада по 31 березня. Дані досліджень узагальнено протягом 30-річного періоду спостережень (1980-2010 рр.). Головною метою цих досліджень стало обчислення можливої кількості додаткових опадів, які можна було б отримати протягом сезону робіт, здійснюючи штучний вплив на всі хмари, з яких зафіксовано випадіння природних опадів. У [5] було показано, що за умови використання

для штучних впливів усіх (100 %) хмар, з яких випадають природні опади, можливе збільшення суми природних опадів за сезон проведення робіт (5 місяців) може становити від 47,3 мм на півдні до 72,7 мм на північному заході цієї області (від 32 % до 41 % суми природних опадів за сезон).

Ця стаття присвячена узагальненню результатів подібних обстежень ресурсів хмар та розподілу природних опадів у сезони проведення робіт на метеостанціях Херсонської області за тридцятирічний період (з 1980 по 2010 рік). Її мета – визначити можливу кількість додаткових опадів, які могли би бути отримані внаслідок штучного впливу на хмари, з яких випадали природні опади, протягом сезону робіт у цій частині України.

Матеріали та методи досліджень, отримані результати

Для обстежень розподілу природних опадів застосовано дані метеорологічних спостережень за кількістю, видом, типами та часом випадіння (початок – закінчення) атмосферних опадів