

КРІГІНГ-ІНТЕРПОЛЯЦІЯ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗУ ПОГОДИ

У статті запропоновано використання методу крігінг-інтерполяції для постмодельної обробки даних прогнозу погоди. Описано алгоритм методу. Обґрунтовано доцільність його використання в ході розв'язання задач прогнозу погоди. Представлено результати застосування крігінг-інтерполяції до даних прогнозу метеорологічної моделі COSMO. Проведено аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: прогноз погоди, математичне моделювання, постмодельна обробка, інтерполяція, метод крігінга.

Вступ

Сучасна світова практика прогнозування метеорологічних величин ґрунтується на використанні математичних моделей, робота яких проходить у три етапи: домодельна підготовка даних, реалізація моделі та післямодельна (постмодельна) обробка результатів [1]. В основу прогностичних моделей покладено багатовимірні рівняння гідродинаміки, що в умовах непередбачуваності зміни метеорологічних величин не мають аналітичних розв'язків [2]. Чисельні методи, що використовують для розв'язання таких рівнянь, вимагають певного вигляду вхідних та вихідних даних. Проводиться дискретизація (сіткове розбиття) простору, у точках якого подаються початкові дані й отримується прогноз. Проте дані вимірювань, як правило, розподілені просторово неоднорідно, а прогноз часто потрібен у точках простору, що не збігаються з вузлами модельної сітки. Саме тому важливою проблемою чисельного прогнозування є проблема аналізу просторово-розподіленої інформації по метеорологічних даних.

Цю проблему представлено низкою конкретних задач:

- оцінити значення в точці, де виміри не проводились (домодельна обробка даних);
- визначити значення в точці, що не належить модельній сітці (постмодельна обробка даних);
- оцінити помилку інтерполяції.

Аналіз даних і його результати залежать як від якості й кількості вимірюваних значень, так і від методів їх обробки.

На сьогодні існує широкий спектр методів та інструментів аналізу, обробки та представлення просторово-розподіленої інформації. Серед них: інтерполятори (триангуляція, метод зворотних

квадратів, метод кубічних сплайнів та ін.), методи, що базуються на статистичній інтерпретації даних, алгоритми штучного інтелекту та ін.

Для отримання найкращої (у статистичному розумінні) просторової оцінки використовують метод крігінга. Важливою властивістю крігінга є точне відтворення значень вимірювань у точках, де вони відомі. Але на відміну від багатьох методів інтерполяції оцінка крігінга супроводжується оцінкою похибки інтерполяції в кожній точці.

У цій статті відображено суть процедури крігінга та результати його застосування для інтерполяції метеорологічних величин (тиск, температура, опади), що отримані за допомогою моделі COSMO, на неоднорідну сітку метеостанцій України.

Мета роботи – визначити ефективність застосування методу крігінга під час інтерполяції метеорологічних величин, а також встановити доцільність його застосування під час адаптації кращих світових зразків математичних моделей прогнозу погоди для території України.

Крігінг

Розглянемо проблему оцінювання значення деякої метеорологічної величини V у деякій точці розрахункової сітки x . Основою для цього буде служити набір з n вимірювань значень метеорологічної величини, зроблених у точках x_1, x_2, \dots, x_n розрахункової області. Необхідно побудувати інтерполяційну функцію V^* , що буде «гарною» оцінкою невідомої нам функції V . Базовим методом оцінювання в геостатистичці є крігінг. Термін крігінг було взято для означення сімейства алгоритмів просторової регресії [3]. Саме слово крігінг походить від імені південно-африканського вченого Д. Кріга (D. Krige), на честь якого Г. Матерон назвав базовий геостатистичний метод [8].

Як і інші класичні методи інтерполяції, крігінг базується на розрахунку вагів $w_1(x), w_2(x), \dots, w_n(x)$ для кожної шуканої точки x . Оцінка значення метеорологічної величини в точці x визначається, як лінійна комбінація відомих нам значень із цими вагами:

$$V^*(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x)V(x_i). \quad (1)$$

В основі методу лежить припущення, що функція $V(x)$ – це деякий випадковий процес. Відповідно $V(x_1), V(x_2), \dots, V(x_n)$ – випадкові величини. Тоді їх лінійна комбінація $V^*(x)$ теж є випадковою величиною. Коефіцієнти $w_i(x)$ розраховуються таким чином, щоб математичне сподівання результуючої величини $V^*(x)$ дорівнювало математичному сподіванню значення випадкового процесу $V(x)$ у цій точці:

$$M(V^*(x)) = M(V(x)). \quad (2a)$$

Умова (2a) забезпечує властивість незміщеності методу. Оптимальність оцінки забезпечується такою умовою – дисперсія різниці $V^*(x) - V(x)$ повинна бути мінімальною:

$$D(V^*(x) - V(x)) \rightarrow \min. \quad (2b)$$

Отже, крігінг забезпечує найкращу незміщену оцінку.

Для виконань умов (2) метод крігінга повинен мати деякі уявлення про природу випадкового процесу $V(x)$, тобто знати модель випадкового процесу. Як модель використовується функція $\gamma(a, b)$, що характеризує залежність очікуваної різниці значень між точками a і b від відстані між цими точками. Мірою очікуваної різниці є умовна дисперсія різниці значень у відповідних точках:

$$\gamma(a, b) = D(V(a) - V(b)). \quad (3)$$

Тоді, згідно з [4], вимагаючи виконання умов (2), знаходимо систему рівнянь крігінга, з якої отримуємо оптимальні значення $w_1(x), w_2(x), \dots, w_n(x)$:

$$\begin{pmatrix} w_1(x) \\ \dots \\ w_n(x) \\ \mu(x) \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} \gamma(x, x_1) \\ \dots \\ \gamma(x, x_n) \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де

$$A = \begin{pmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \dots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(x_n, x_1) & \dots & \gamma(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$\mu(x)$ – множник Лагранжа, що дозволяє надалі визначити похибку методу крігінга.

Отримані із системи (4) ваги $w_1(x), w_2(x), \dots, w_n(x)$ підставляємо у формулу (1) і отримуємо шукане $V^*(x)$.

Таким чином, для розрахунку $w_1(x), w_2(x), \dots, w_n(x)$ використовуються не значення $V(x_1), V(x_2), \dots, V(x_n)$, а лише розташування точок x_1, x_2, \dots, x_n і модель випадкового процесу – варіограма. Проте, якщо для побудови варіограми використовуються величини $V(x_1), V(x_2), \dots, V(x_n)$, то зрозуміло, що результат інтерполяції буде нелінійно від них залежати.

У [4, 5] показано, що варіограма будується за таким алгоритмом:

- спочатку, згідно з (3) будується експериментальна варіограма, використовуючи $V(x_1), V(x_2), \dots, V(x_n)$;

- експериментальна варіограма апроксимується модельною функцією, значення якої використовуються в системі рівнянь (4).

Експериментальна варіограма розраховується за формулою для всіх пар точок вимірювання, відстань між якими дорівнює h :

$$\gamma(h) = 0.5 \cdot \text{average}((V(x_i) - V(x_j))^2) \quad (5)$$

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

У разі, коли кожна пара має унікальну відстань, що характерно для просторового розташування метеорологічних станцій, розташування всіх пар залежно від відстані між точками стає некерованим.

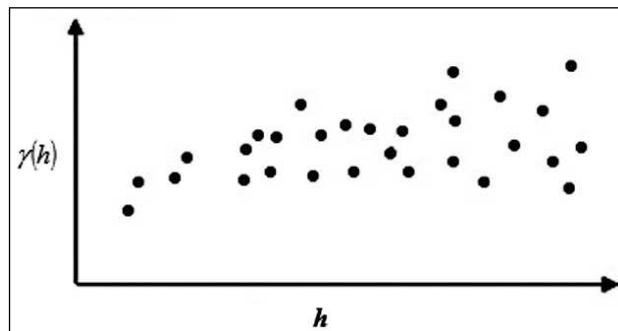


Рис. 1. Приклад діаграми експериментальної варіограми

Тоді вони групуються в так звані “комірки відставання” або “інтервальні комірки” (англ. мовою “lag bins”) [5]. Наприклад, знаходиться середня варіограма для всіх пар, відстань між якими понад 10 км, але менша ніж 20 км. Отже, експериментальна варіограма – це діаграма відстані (або lag) на осі x і усереднених значень варіограми (5) на осі y .

Наступним кроком є встановлення моделі (неперервної функції) для точок, що формують експериментальну варіограму. Для цього потрібно вибрати функцію, яка служить моделлю. Існує великий вибір моделей варіограм, проте найбільш використовуваними є такі:

- кругова;
- сферична;
- експоненціальна;
- Гаусова;
- лінійна.

Вибрана модель впливає на прогноз невідомих значень. Чим крутіша крива на початку варіограми, тим більший вплив на прогноз буде мати найближчий окіл. У результаті вихідна поверхня буде менш згладженою. Кожну модель розробляють з метою забезпечити якомога точнішу відповідність відтворюваного поля фактичному просторовому розподілу для різних метеорологічних величин та атмосферних явищ.

Окрім оцінки (прогнозу) значення метеорологічної величини в невідомій точці, крігінг дозволяє оцінити похибку самого себе. Похибка визначається у вигляді дисперсії відхилення обчисленого значення від істинного невідомого:

$$D(V^*(x) - V(x)) = \begin{pmatrix} w_1(x) \\ \dots \\ w_n(x) \\ \mu(x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma(x, x_1) \\ \dots \\ \gamma(x, x_n) \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Проте, згідно з [3] значення похибки за формулою (6) може бути занижене. Тому, оцінюючи роботу крігінга, варто проводити додаткові дослідження точності інтерполяції.

Недоліком крігінга є його обчислювальна складність, що значно більша за складність багатьох інтерполяторів [5]. В умовах обмежених можливостей обчислювальної техніки вітчизняної науки цей недолік видається суттєвим.

Інтерполяція даних у постмоделній обробці

В УкрГМІ наразі експлуатуються в оперативному режимі чотири мезомасштабні атмосферні моделі прогнозу погоди (WRF ARW v.2.2.1, WRF ARW v.3.3.1, WRF NMM v.3.3.1 та COSMO [6]) і модель прогнозу вітро-хвильового режиму Чорного та Азовського морів SWAN. У процесі адаптації та верифікації моделі для території України проводиться інтерполяція вихідних даних у точки, в яких розташовані пункти спостережень (метеостанції) нашої держави. Це необхідно для проведення порівняння результатів прогнозу моделі із реальними даними вимірювань метеорологічних величин, що, насамперед характеризує

якість роботи моделі для території України. В УкрГМІ на сьогодні для інтерполяції даних всіх атмосферних моделей використовується білінійна локальна інтерполяція, суть якої полягає в проведенні локальної інтерполяції спочатку по осі абсцис, а потім по осі ординат. Ураховуючи відстані між точками модельної сітки (понад 10 км), зрозуміло, що такий підхід може давати результати зі значною похибкою. Застосування методу крігінга в цій ситуації видається виправданим.

Крігінг було застосовано для інтерполяції результатів розрахунків, отриманих за допомогою чисельної моделі прогнозу погоди COSMO [7]. Цю модель було створено в межах однойменного консорціуму (Consortium for Small-scale Modeling), який засновано в жовтні 1998 р. Головною його метою є створення, вдосконалення та підтримка розвитку негідростатичних моделей атмосфери на обмежених територіях (мезо-β і мезо-γ масштаби) для потреб оперативної практики та наукових досліджень. Головними учасниками консорціуму є гідрометеорологічні служби Німеччини, Швейцарії, Італії, Греції, Польщі, Румунії, Росії та чотири науково-дослідні центри Німеччини та Італії. Модель COSMO вперше в оперативну практику було введено в 1999 р. в Німеччині. З того часу вона себе зарекомендувала як надійний засіб для прогнозування погоди, а за своїми технічними характеристиками та якістю прогнозу погоди перевершила модель HRM, котру було розроблено Німецькою службою погоди й експлуатували її (переважно на комерційній основі) у 29 країнах світу. В УкрГМІ COSMO було реалізовано на комп'ютерній архітектурі x86_64 в середовищі ОС CentOS v.6.2 з використанням системних компіляторів, які встановлено на платформі gcc та gfortran. Підтримку мультипроцесорних обчислень здійснювали за допомогою бібліотеки OpenMPI. Розрахункова область – 209 x 101 вузлів, кроки по горизонталі – 0,125° (~14 км), 50 рівнів по вертикалі. Координати крайнього південно-західного вузла області моделювання: 42,50° пн. ш. та 17,0° зх. д. Завчасність прогнозів становить 75 годин.

Під час реалізації методу крігінга було використано лінійну модель, яка застосовується в тих випадках, коли не встановлено модель просторового розподілу значень інтерпольованої величини.

Результати тестування

Для тестування було вибрано результати прогнозу COSMO за 08.04.2012 року. У цей день динаміка та розподіл значень метеорологічних величин по території України відзначились осо-

бливою нестабільністю та значними перепадами. На думку авторів, саме така синоптична ситуація дозволить повноцінно перевірити роботу методу та визначити його ефективність.

Тестування проводилось у два етапи:

- порівняння результатів інтерполяції крігінга із вимірами на метеостанціях України;
- розв'язання обернених задач: інтерполяція значень, отриманих методом крігінга на неоднорідній сітці метеостанцій України, у вузлі вихідної сітки моделі COSMO. Порівняти результати оберненої інтерполяції з результатами прогнозу моделі.

На першому етапі порівнювали отримані результати крігінг-інтерполяцією з реальними даними, а також із результатами білінійної локальної інтерполяції, що використовується в УкрГМІ для постмодельної обробки даних. У табл. 1 представлено максимальну δ_M та середню похибку σ , розраховані по всій неоднорідній сітці метеостанцій для температури та опадів для певного моменту часу:

$$\delta_M = \max_{0 \leq i \leq N} |\mathfrak{R}(x_i, T) - y_{i,T}|,$$

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (\mathfrak{R}(x_i, T) - y_i^K)}{N},$$

де $\mathfrak{R}(x_i, T)$ – значення деякої метеорологічної величини в точці x_i в момент часу T , отримане інтерполяцією, y_i^T – значення тієї ж метеорологічної величини в момент часу T , виміряне на i -тій метеостанції (у точці x_i), $T \in \{03,06,09,12,15,18,21\}$ год, N – кількість метеостанцій України, M – номер вузла сітки, в якому отримано максимальне відхилення у від \mathfrak{R} .

Із наведених у табл. 1 даних видно, що крігінг інтерполює дані дещо краще, ніж білінійна локальна інтерполяція. Слід зауважити, що великі максимальні похибки обумовлені похибкою моделі COSMO для прибережних та гірських станцій.

Убачається, що застосування крігінг-інтерполяції з урахуванням висоти розташування метеостанцій дасть змогу покращити прогноз у відповідних регіонах. Ця проблема виходить за межі тематики цієї статті і буде розглядатися авторами надалі.

На другому етапі тестування результати розв'язання оберненої задачі порівнювали з результатами прогнозу COSMO. Як і раніше, знайдено максимальну δ_M та середню σ похибки, розраховані по всій сітці моделі для кожної метеорологічної величини для заданого строку спостережень. Результати порівняння відображено в табл. 2, а також частково візуалізовано на рис. 2, 3.

Порівнюючи поля приземної температури повітря та приведеного атмосферного тиску, які було побудовано за даними прогнозу моделі COSMO у вузлах регулярної сітки (див. рис. 2а та рис. 3а) та результатами оберненої задачі (рис. 2б та рис. 3б), можна відзначити, що крігінг-інтерполяція досить точно відтворює загальну картину прогнозу навіть за умови значних і нерівномірних відстаней між точками сітки метеостанцій, що була вихідною для оберненої задачі. Відсутність градієнтів температури та відмінності в полі тиску пов'язано із зазначеною вище обставиною. Треба звернути увагу на той факт, що метод крігінга дозволяє представити поля метеорологічних величин у більш згладженому вигляді, при цьому градієнти набувають плавності.

Таблиця 1

Середнє та максимальне відхилення результатів білінійної та крігінг-інтерполяції від значень вимірювань метеорологічної величини (температури, опадів) на мережі метеостанцій України

Т, год	Температура, °С				Кількість опадів, мм			
	$\delta_{біл, макс}$	$\delta_{кр, макс}$	$\sigma_{біл, сеп}$	$\sigma_{кр, сеп}$	$\delta_{біл, макс}$	$\delta_{кр, макс}$	$\sigma_{біл, сеп}$	$\sigma_{кр, сеп}$
03	7,50	7,46	1,27	0,76	-	-	-	-
06	6,00	6,14	1,32	0,71	10,90	10,80	1,16	1,14
09	9,60	9,18	1,85	1,24	-	-	-	-
12	17,30	17,42	2,14	1,67	4,40	3,90	0,43	0,46
15	13,10	13,03	1,91	1,29	-	-	-	-
18	11,70	11,32	1,47	0,69	35,20	35,20	2,07	2,02
21	11,20	10,81	1,30	0,63	-	-	-	-

Примітка: Т – строк спостережень (за Гринвічем); $\delta_{біл, макс}$ – максимальна похибка метеорологічної величини, отримана білінійною інтерполяцією; $\delta_{кр, макс}$ – максимальна похибка метеорологічної величини, отримана крігінг-інтерполяцією; $\sigma_{біл, сеп}$ – середня похибка метеорологічної величини, отримана в ході використання білінійної інтерполяції; $\sigma_{кр, сеп}$ – середня похибка метеорологічної величини, отримана крігінг-інтерполяцією.

Відхилення результатів оберненої задачі від даних прогнозу моделі COSMO

Т, год	Тиск, гПа		Температура, °С		Кількість опадів, мм	
	δ_M	σ	δ_M	σ	δ_M	σ
03	2,99	0,37	6,74	0,69	1,59	0,04
06	3,97	0,44	6,18	0,83	1,31	0,03
09	4,89	0,54	9,15	1,3	1,03	0,04
12	5,53	0,60	8,92	1,33	1,23	0,06
15	5,87	0,49	8,7	1,23	1,75	0,07
18	5,02	0,46	7,08	0,98	1,82	0,05
21	5,26	0,44	6,46	0,83	0,98	0,04

Примітка: Т – строк спостережень (за Гринвічем); δ_M – максимальна похибка метеорологічної величини; σ – середня похибка метеорологічної величини.

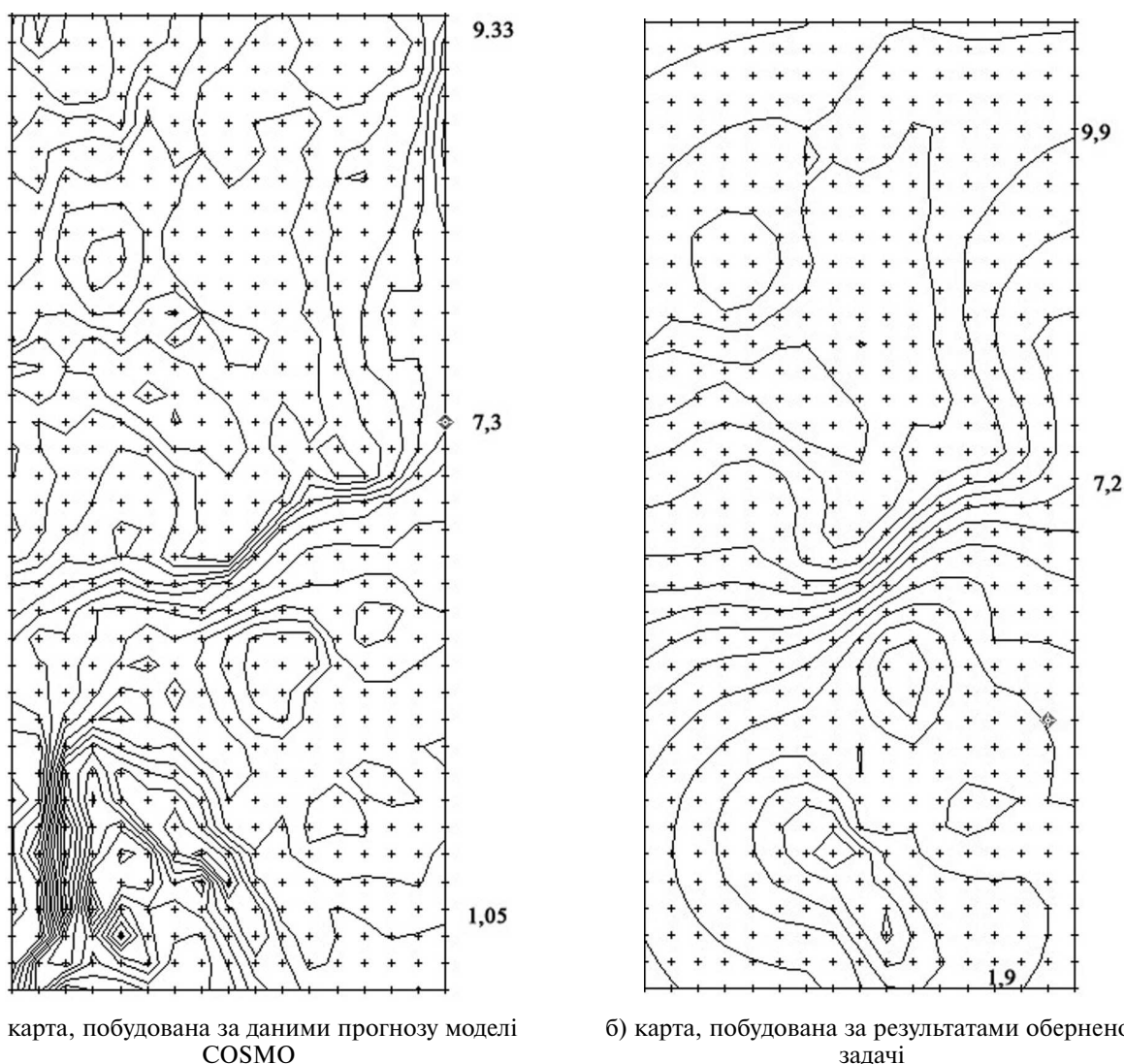


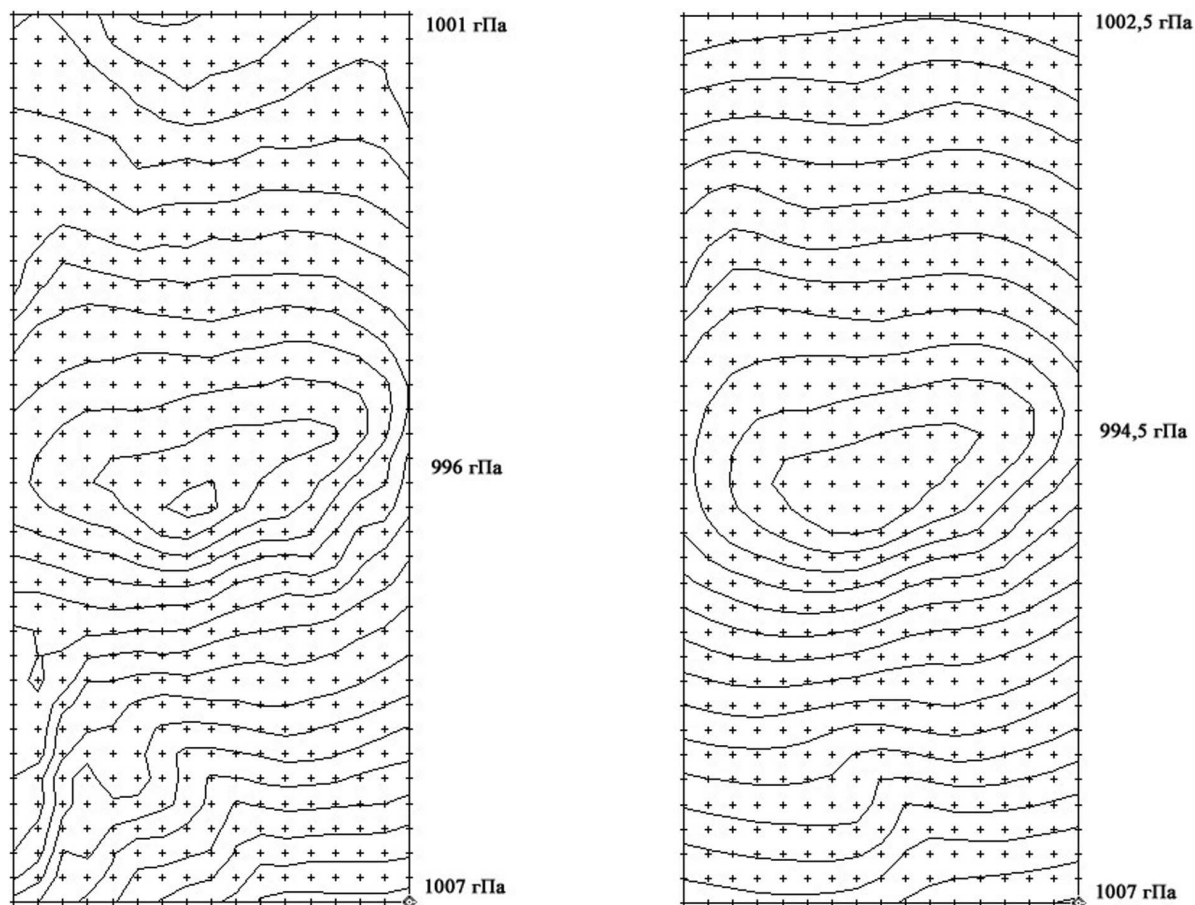
Рис. 2. Фрагмент просторового розподілу приземної температури повітря [°С] 08.04.2012 (21 год за Гринвічем)

Значення максимальної та середньої похибок під час розв'язання оберненої задачі цілком задовільні та свідчать про ефективну роботу методу крігінга на наборах значень метеопараметрів, зокрема тиску, температури, кількості опадів. Дані табл. 2 підтверджують доцільність використання

методу крігінга в задачах чисельного прогнозу погоди.

Висновки

Помилки, отримані в ході розв'язання прямої та оберненої задач, цілком припустимі й



а) карта, побудована за даними прогнозу моделі COSMO

б) карта, побудована за результатами оберненої задачі

Рис. 3. Фрагмент просторового розподілу приведеного атмосферного тиску [гПа] 08.04.2012 (21 год за Гринвічем)

дають можливість стверджувати, що метод крігінга можна використовувати під час інтерполяції даних прогнозу метеомоделей. Крігінг дещо розмиває поле величини, що є природним, урахувавши використання лінійної моделі в основі методу. Одночасно в ході експерименту автори встановили, що застосування різних моделей для інтерполяції метеовеличин покращує результати інтерполяції.

Автори запропонували використовувати метод крігінга для постмодельної обробки даних прогнозу погоди з таких міркувань:

- метод крігінга ґрунтується на виконанні умов (2) і таким чином забезпечує найкращу незміщену оцінку значення параметра (метеорологічної величини) в деякій точці;
- похибка методу не залежить від відстані між вхідними даними і точкою, в якій оцінюється значення параметра, на відміну від більшості методів інтерполяції;
- метод крігінга дозволяє здійснювати ін-

терполяцію в тривимірному просторі (у двох горизонтальних напрямках та по вертикалі).

Варто також відзначити, що, залежно від задачі, яка вирішується, необхідно мати на увазі, що застосування крігінг-інтерполяції є значно витратнішим у плані машинного часу порівняно з більшістю інших методів інтерполяції (наприклад, лінійною, білінійною, кубічним сплайном тощо).

Для аналізу роботи методу було проведено тестування методу на даних прогнозу моделі COSMO, результати якого представлено вище.

Аналіз результатів тестування показав, що метод дає хорошу оцінку в точках, де значення параметрів невідоме. Крігінг-інтерполяцію доцільно використовувати в постмодельній обробці даних прогнозу погоди.

Щодо перспектив подальшого дослідження, то, на думку авторів, виявлення закономірностей та встановлення найвідповідніших моделей для окремих параметрів дасть можливість значно підвищити точність їх відтворення. Очікується,

що формулювання задачі застосування крігінг-інтерполяції з урахуванням висоти розташування метеостанцій дасть змогу покращити прогноз метеорологічних величин у гірських районах.

* *

1. Прусов В.А., Дорошенко А.Ю. Моделирование природных и техногенных процессов в атмосфере. — К.: Наук. думка, 2006. — 542 с.
2. Марчук Г.И. Численные методы в прогнозе погоды. — Л.: Гидрометеоздат, 1967. — 353 с.
3. Oliver M.A. Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems // International Journal of Geographic Information Systems. — 1990. — Vol. 4. — P. 313-332.
4. Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Савельева Е.А., Чернов С.Ю., Тимонин В.А. Элементарное введение в геостатику // ВИНТИ. Серия “Проблемы окружающей среды и природных ресурсов”. — М. — 1999. — №11. — 135 с.
5. Справка ArcGIS 10.1: <http://resources.arcgis.com>
6. Офіційний сайт УкрГМІ: <http://uhmi.org.ua/>
7. Doms G.A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model: www.cosmo-model.org
8. http://www.geostatcam.com/Adobe/G_Matheron.pdf

Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ

Кацалова Л.Н., Шпиг В.М.

Кригинг-интерполяция в задачах прогноза погоды

В статье предложено использование метода кригинг-интерполяции для постмодельной обработки данных прогноза погоды. Описан алгоритм метода. Обоснована целесообразность его использования для решения задач прогноза погоды. Представлены результаты использования кригинг-интерполяции для данных прогноза погоды метеорологической модели COSMO. Проведён анализ полученных результатов.

Ключевые слова: прогноз погоды, математическое моделирование, постмодельная обработка, интерполяция, метод кригинга.

Katsalova L.M., Shpyg V.M.

Application of kriging-interpolation in weather forecast

In this article the usage of the kriging-interpolation method for weather forecast model post-processing is proposed. Algorithm of method is described. Reasonability of its usage in weather forecast is justified. Results of the kriging-interpolation application for COSMO model forecast are presented. Analysis of obtained results is carried out.

Keywords: weather forecast, mathematical modeling, post-processing, interpolation, kriging method.

УДК 551.510

В.Е. Тимофеев

МНОГОЛЕТНЕЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА И ЕГО ПРИЧИНЫ

Приведены оценки многолетнего изменения температуры воздуха в районе Антарктического полуострова с детализацией по станции “Академик Вернадский”. Большое внимание уделено оценке однородности рядов. По данным последнего десятилетия отмечено прекращение дальнейшего возрастания температуры воздуха на фоне уменьшения изменчивости температуры воздуха на отдельных станциях по сравнению с серединой XX ст. Среди причин изменений регионального климата указываются атмосферная циркуляция и Эль-Ниньо.

Ключевые слова: потепление, климат, температура воздуха, корреляция, тренд, Эль-Ниньо.

Введение

Исследование глобального и регионального климата, а также оценок его будущего изменения является наиболее актуальным вопросом современной климатологии. Как известно, повышение глобальной температуры отмечалось в течение XX века и продолжается до настоящего времени. В вековом ходе изменения аномалии глобальной

температуры XX ст. выделяются два периода потепления, которые проявляются и в Северном, и в Южном полушариях [5, 22]. Второй период потепления охватил как Южную полярную область (ЮПО), так и умеренные широты, причем в Южном полушарии он начался несколько раньше, чем в Северном [1].

Наиболее интенсивное потепление в Юж-