

УДК 504+004.9

В. Б. Мокін, д-р техн. наук, проф.;**Є. М. Крижановський**, канд. техн. наук;**Ю. С. Семчук**, студ.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОРДИНАРНОГО КРИГІНГУ ГЕОСТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ВОД РІЧОК З УРАХУВАННЯМ ЇХ ЗВИВИСТОСТІ

Удосконалено метод ординарного кригінгу геостатистичного аналізу для моделювання якості вод річок з урахуванням їх звивистості за рахунок урахування відстані вздовж течії річки між створами спостереження якості поверхневих вод під час визначення ваг, що використовуються в алгоритмах інтерполяції методу геостатистичного аналізу. Підвищення точності вдосконаленого методу було підтверджено під час моделювання якості поверхневих вод на прикладі р. Південний Буг в районі м. Ладижин, що дало зменшення похибки інтерполяції на більше, як 14 %.

1. Постановка задачі

Суттєвий розвиток національного господарства України в останні роки, особливо у порівнянні з першою половиною 90-х минулого сторіччя, поява нових забруднювальних речовин, вплив яких на екосистеми ще недостатньо вивчений, мала забезпеченість водними ресурсами населення України, у порівнянні з середньою по Європі, — все це зумовлює актуальність наукових досліджень, спрямованих на пошук нових методів і розробку методик аналізу даних екологічного моніторингу та оцінювання екологічного стану поверхневих вод нашої країни. Задача ускладнюється тим, що створи екологічного моніторингу поверхневих вод у нашій країні мають різну відомчу підпорядкованість, розташовані нерегулярно, мають різні регламенти спостережень, розташовані групами в районі значних джерел забруднення довкілля, які є досить віддаленими одна від іншої уздовж річок, що, в цілому, суттєво ускладнює процес отримання повної неперервної картини про екологічний стан вод за даними системи державного моніторингу. Для побудови неперервних інтерпольованих поверхонь значень показників якості поверхневих вод зазвичай використовуються детерміновані та геостатистичні методи аналізу. Детерміновані методи інтерполяції ґрунтовані на підборі математичних функцій поверхонь з метою їх припасовування через точки з вимірними значеннями. Геостатистичні методи інтерполяції ґрунтовані на статистичних моделях, що враховують просторову автокореляцію (статистичні взаємовідношення між опорними точками). За їх допомогою можна не тільки будувати поверхню, але й отримувати оцінку точності інтерполяції. На відміну від детермінованих методів геостатистичні враховують також вірогідність [1].

Розрахунки за методами геостатистичного аналізу автоматизовано у пакеті «ArcGIS ArcInfo» та включено до складу додаткового модуля «ArcGIS Geostatistical Analyst».

Методи геостатистичного аналізу традиційно використовуються для моделювання якості атмосферного повітря [2—6]. Застосування ж цих методів до моделювання якості води у річках вносить похибку, обумовлену тим, що річки течуть не по прямій, а на досить протяжних ділянках (десятки і сотні кілометрів), зазвичай, мають значну звивистість.

Метою статті є підвищення точності інтерполяції, застосовуючи метод ординарного кригінгу геостатистичного аналізу для моделювання якості вод у річках, за рахунок більш коректного врахування відстані між створами спостереження уздовж течії річки.

2. Розв'язання задачі

До геостатистичних методів належать методи кригінгу і кокригінгу. Метод кригінгу включає два основних завдання: спочатку встановити структуру просторових даних, відому як варіограма, а потім побудувати поверхню, використовуючи значення варіограми і вимірні значення в окремих точках [3].

Однак існують випадки, коли річки, де розташовані створи спостереження, мають досить високий коефіцієнт звивистості, тобто відношення вимірної по всіх звивинах довжини річки до довжи-

ни прямої, проведеної від витоку до гирла річки, значно перевищує 1. В таких випадках, застосовуючи класичний метод ординарного кригінгу, який враховує найкоротші відстані між точками, тобто створами спостереження, і в залежності від цього, визначаються ваги, які далі використовуються в алгоритмі інтерполяції. Але в таких випадках відстань між створами спостережень уздовж річки значно більша, ніж та відстань, яку враховує класичний метод ординарного кригінгу геостатистичного аналізу.

Метод ординарного кригінгу оснований на обчисленні для кожної точки ваг $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Тоді інтерполятор буде отриманий як зважена сума даних [4]

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i), \tag{1}$$

де $Z(s_i)$ — вимірне значення в i -й точці; λ_i — невідома вага для вимірного значення в i -й точці; s_0 — координати шуканої точки; N — кількість опорних точок.

Розв'язок дає рівняння кригінгу [3]

$$G \cdot \lambda = g. \tag{2}$$

де

$$G = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \dots & 0 & \dots & 1 \\ \gamma_{N1} & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad g = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \dots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

тобто

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \dots & 0 & \dots & 1 \\ \gamma_{N1} & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_N \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \dots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Для розрахунку значень матриць G та g потрібно вивчити структуру даних шляхом створення емпіричної варіограми (рис. 1).

Емпірична варіограма — це засіб для дослідження зв'язків між точками. Пари точок, розташовані на близькій відстані одна від одної, повинні мати меншу різницю у вимірних значеннях, ніж ті точки, що більш віддалені одна від іншої. Наскільки це припущення правильне, можна вивчити по емпіричній варіограмі [5].

На варіограмі показані значення половини квадрата різниці для пар точок (відкладається по осі y) залежно від відстані між ними (відкладається по осі x).

Далі здійснюється підбір моделі для емпіричної варіограми, яка буде використовуватись для визначення значення варіограми для різних відстаней.

В програмний модуль ArcGIS Geostatistical Analyst включена велика кількість моделей, які можна використовувати для підбору.

Гамма-матриця G містить змодельовані значення варіограми для всіх пар опорних точок, де γ_{ij} означає змодельовані значення варіограми, визначені на відстані між двома опорними точками — i та j . Матриця g містить змодельовані значення варіограми для кожної пари з опорної точки і шуканої точки, де γ_{i0} означає змодельовані значення варіограми, визначене на відстані між i -ю та шуканою точкою [3].

Після того, як побудовані матриці G та g , необхідно знайти значення вектора λ , що містить значення ваг, які будуть присвоєні вимірним значенням, що знаходяться довкола шуканої точки. Для цього виконується проста операція з матричної алгебри і отримується така формула [3]:

$$\lambda = G^{-1} \cdot g. \tag{6}$$

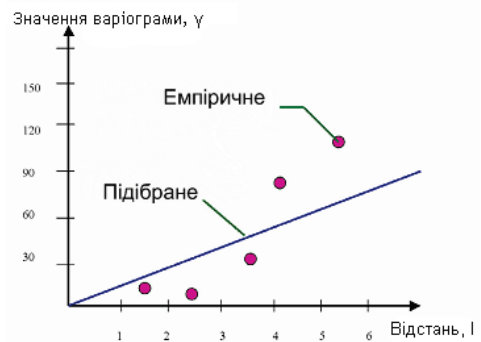


Рис. 1. Побудова варіограми

Коли вже є значення ваг, вага кожної точки множиться на вимірне в ній значення. Результати додаються і отримують шукане значення для точки за (2).

Перший крок у створенні емпіричної варіограми — це обчислення відстані і квадрата різниці між значеннями для кожної пари точок. Відстань між двома точками розраховується з використанням відстані Евкліда [6]

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} . \tag{7}$$

Графічне представлення варіограми використовується для відображення просторової кореляції точкових даних із даними у сусідніх точках. Графік варіограми відображає збільшення відмінності між значеннями в точках із збільшенням відстані між ними. При цьому відстань між точками визначається по найкоротшому шляху.

Однак, якщо річка має досить високий коефіцієнт звивистості, тоді відстань між створами спостережень, що визначається за формулою (7), тобто по найкоротшому шляху, спричинить значну похибку. Відстань між створами пропонується визначати уздовж течії річки.

3. Приклад розв’язання задачі

Для розв’язання задачі беруться дані моніторингу стану поверхневих вод, а саме басейну річки Південний Буг.

Для дослідження стану забруднення річки Південний Буг було вибрано ділянку в районі м. Ладизин, на якій річка має досить значний коефіцієнт звивистості і, у той же час, є створи спостережень якості води (рис. 2).

Для аналізу були використані дані системи державного моніторингу поверхневих вод за 2002 рік. Аналіз проводився за значенням концентрації нітратів (табл. 1).



Рис. 2. Ділянка річки Південний Буг, що має досить значний коефіцієнт звивистості, та створи спостережень якості поверхневих вод вздовж течії річки

Таблиця 1

Дані державного моніторингу стану забруднення річки Південний Буг

№ Створу спостереження		Концентрація нітратів (NO ₃), мг/л
на рис. 2	в системі державного моніторингу довкілля Вінницької області	
1	38	0,102
2	77	0,239
3	78	0,2435
4	8	0,0355
5	39	0,0735

Порівняємо застосування відомого та удосконаленого методів до знаходження невідомої концентрації, які здійснюються за таким алгоритмом:

1. Визначення відстані між створами спостережень якості води (створи 1—4) по прямій та уз-

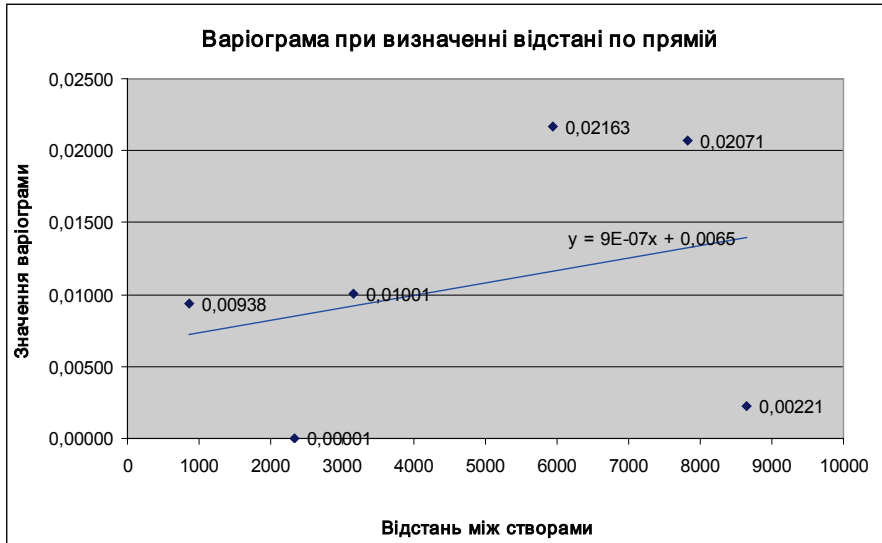
довж течії річки засобами ГІС.

Таблиця 2

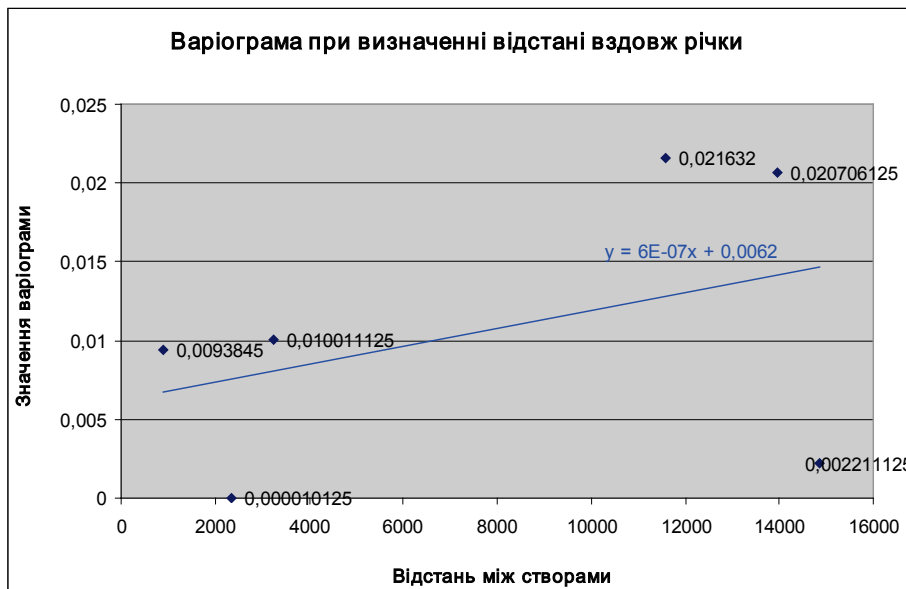
Визначення відстані між створами спостережень якості води по прямій та уздовж річки

Створи	Відстань між створами спостережень, м	
	по прямій	уздовж течії річки
1 і 2	859	895
1 і 3	3150	3257
1 і 4	8648	14845
2 і 3	2341	2362
2 і 4	7824	13950
3 і 4	5944	11588

2. Побудова варіограм. Будуються варіограми, наприклад, засобами MS Excel (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Побудова варіограм: а) у разі визначення відстані по прямій, б) у разі визначення відстані вздовж річки

Зі збільшенням кроку варіограма збільшується до максимальних значень за деякого значення a , яке називають радіусом кореляції. З подальшим збільшенням кроку значення варіограми не зростають, тобто втрачається залежність різниці значень у двох місцеположеннях від відстані між ни-

ми. Цю величину «насичення» варіограми називають поріг (sill). В цьому випадку між точками 1 та 4 зв'язок практично відсутній, оскільки вони знаходяться на великій відстані (8648 м) одна від одної, але значення майже не відрізняються.

3. Побудова матриць G та g і визначення ваг кригінгу (табл. 3).

Таблиця 3

Побудова матриць G та g і визначення ваг кригінгу

Матриці та ваги кригінгу	Метод 1 (визначення відстані по прямій)					Метод 2 (визначення відстані уздовж річки)						
	Матриця G	Матриця G	№ ств. сп.	1	2	3	4	Матриця G	№ ств. сп.	1	2	3
1		0	0,0072731	0,0093335	0,014	1	1	0	0,006737	0,0081542	0,01511	1
2		0,0072731	0	0,0086069	0,014	1	2	0,006737	0	0,0076172	0,01457	1
3		0,0093335	0,0086069	0	0,012	1	3	0,0081542	0,0076172	0	0,01315	1
4		0,0142832	0,0135416	0,0118496	0	1	4	0,015107	0,01457	0,0131528	0	1
		1	1	1	1	0		1	1	1	1	0
Матриця g	Матриця g	№ ств. сп.	Відстань до т. 5	g	Вектор для т. 5	Матриця g	№ ств. сп.	Відстань до т. 5	g	Вектор для т. 5		
	1		10020	0,015518	1	1		15793	0,0156758			
	2		9140	0,014726	2	2		14898	0,0151388			
	3		7035	0,0128315	3	3		12536	0,0137216			
	4		1719	0,0080471	4	4		948	0,0067688			
									1			
Ваги кригінгу λ	Ваги				Ваги							
			0,0635729					0,061574264				
			0,086122729					0,072240516				
			0,192065784					0,133415454				
			0,658238587					0,732769766				

Як видно з табл. 3, у ході визначення відстані між створами уздовж річки вага створу 3 зменшується, а 4 — збільшується, адже відстань до нього збільшується.

4. Визначення величини концентрації нітратів у воді для створу спостереження № 5 за методом ординарного кригінгу геостатистичного аналізу.

Таблиця 4

Визначення величини концентрації нітратів для створу спостереження № 5

Метод 1 (визначення відстані по прямій)				Метод 2 (визначення відстані уздовж течії річки)			
№ ств. сп.	Вектор вагів кригінгу	$\lambda = G^{-1} * g$	Результат	№ ств. сп.	Вектор вагів кригінгу	$\lambda = G^{-1} * g$	Результат
1	0,0635729	0,102	0,00648444	1	0,061574264	0,102	0,00628057
2	0,086122729	0,239	0,02058333	2	0,072240516	0,239	0,01726548
3	0,192065784	0,2435	0,04676802	3	0,133415454	0,2435	0,032488666
4	0,658238587	0,0355	0,02336747	4	0,732769766	0,0355	0,02601333
			0,09720326				0,08204605

5. Порівняння отриманого значення з фактичним. Результат порівняння наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Порівняння отриманого значення з фактичним (концентрація нітратів, мг/л)

Результати інтерполяції	Значення, отримане із застосуванням методу 1	Значення, отримане із застосуванням удосконаленого методу — методу 2	Фактичне значення
Інтерпольоване значення	0,0972	0,08204	0,0735
Похибка інтерполяції	24 %	10 %	—

Як видно з табл. 4, значення, отримане у разі застосування удосконаленого методу, ближче до фактичного значення на $24 - 10 = 14$ %.

Похибка інтерполяції пояснюється тим, що для точнішого визначення величини концентрації нітратів у воді необхідна більша кількість опорних точок, а також детальніше врахування закономірностей зміни якості води у річці.

Підвищення точності моделювання запропонованим удосконаленим методом у порівнянні з традиційним методом буде значнішим, у разі більш високих значень коефіцієнта звивистості річки.

Висновки

Удосконалено метод ординарного кригінгу геостатистичного аналізу для моделювання якості вод у річках з урахуванням їх звивистості за рахунок урахування відстані уздовж річки між створами спостереження якості поверхневих вод під час визначення ваг, що використовуються в алгоритмах інтерполяції цього методу геостатистичного аналізу. Підвищення точності вдосконаленого методу підтверджене результатами моделювання якості поверхневих вод р. Південний Буг в районі м. Ладжин за даними державного моніторингу якості води.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анпілова Є. С. Аналіз даних якості поверхневих вод басейну р. Сіверський Донець геостатистичним методом / Є. С. Анпілова, О. М. Трофимчук // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях : тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 7—10.09.2009 р., АР Крим с. Рибаче. — Крим, 2009. — С. 5—13.
2. Анализ последствий аварии на Чернобыльской АЭС при помощи ГИС и методов пространственной статистики / (По статье в ArcNews, осень 2003 г.) // ArcReview. Современные геоинформационные технологии. — 2004. — № 4 (31). — 4 с.
3. Using ArcGIS Geostatistical Analyst/[Johnston K., Ver Hoef J., Krivoruchko K., Lucas N.] — USA : ESRI, 2003. — 306 p.
4. Світличний О. О. Основи геоінформатики / О. О. Світличний, С. В. Плотницький. — Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. — 295 с.
5. Krivoruchko K. Introduction to Modeling Spatial Processes Using Geostatistical Analyst / K. Krivoruchko. — USA : ESRI, 2004. — 245 p.
6. Carol A. Using Spatial Statistics in GIS / A. Carol, K. Krivoruchko. — USA : ESRI, 2003. — 309 p.

Рекомендована кафедрою моделювання та моніторингу складних систем

Стаття надійшла до редакції 24.06.11

Рекомендована до друку 30.06.11

Мокін Віталій Борисович — завідувач кафедри моделювання та моніторингу складних систем, **Крижановський Євгеній Миколайович** — старший викладач.

Кафедра моделювання та моніторингу складних систем;

Семчук Юлія Степанівна — студентка Інституту магістратури, аспірантури та докторантури.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця