

А. Р. Ящолт<sup>1</sup>  
Ю. С. Присяжнюк<sup>1</sup>  
В. І. Костик<sup>1</sup>

## МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ВОД РІЧОК ЗАСОБАМИ ГЕОСТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ З УРАХУВАННЯМ НАПРЯМКУ ЇХ ТЕЧІЇ, ЗВИВИСТОСТІ ТА ТОПОЛОГІЇ ПРИТОК

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Здійснено моделювання якості вод річок на основі математичного апарату та з використанням засобів геостатистичного аналізу з урахуванням напрямку течії цих річок, їх звивистості та топології їх приток. Удосконалено традиційний метод та зменшена похибка моделювання, що дозволяє підвищити точність та ефективність розрахунків.*

**Ключові слова:** моделювання, геостатистичний аналіз, якість вод.

### Вступ

Одним із найактуальніших напрямків моделювання процесів у річках є моделювання поширення забруднень. Ця тематика розглянута у великій кількості робіт. Розроблено багато математичних моделей, які описують річкові процеси зміни якості річкових вод. Однак, основними недоліками складних моделей є те, що їх застосування на практиці вимагає великої кількості різноманітних даних, вимірених у певних місцях та у певний час, для збирання яких потрібна велика мережа автоматичних станцій моніторингу кількості та якості поверхневих вод, елементи якої в Україні поки що наявні тільки в окремих місцях та за окремими показниками. З іншого боку, порівняно прості моделі не забезпечують адекватних результатів моделювання та дають велику похибку інтерполяції.

У той же час, враховуючи просторово розподілену природу екологічних процесів для їх моделювання використовують геоінформаційні технології. Обчислювальні можливості цих технологій ґрунтуються на різних методах та алгоритмах, які базуються на математичному апараті інтерполяції експериментальних даних.

Одним із методів, які використовуються для аналізу стану забруднення довкілля, є методи геостатистичного аналізу [1].

Ці методи засновані на понятті кореляції, що розглядається як тенденція двох типів змінних до взаємозалежності. В геостатистиці, інформація про положення точок спостереження у просторі дає змогу обчислити відстань між ними та змоделювати кореляцію як функцію, що залежить від відстані [1].

Методи геостатистичного аналізу дають змогу отримати значення забруднення у будь-якій точці вздовж річки з певною похибкою, яка визначається відстанями до найближчих точок спостережень, регулярністю вимірювань та іншими факторами.

Але класичний математичний апарат геостатистичного аналізу, який включає 6 різновидів кригінгу, не враховує багато особливостей річок, зокрема — напрямку течії річки та топологію її приток. Урахування напрямку течії річки означає, що на шукані значення забруднення враховується вплив значень показників якості води лише в тих точках, які знаходяться вище по течії річки. А врахування топології приток річки означає, що на шукані значення забруднення не можуть впливати, по-перше, значення концентрацій на створах спостережень чи постах, що знаходяться на притоках цієї ж річки нижче за течією, а по-друге, значення показників якості води у річках, розташованих порівняно неподалік від заданої річки, але в іншому водозбірному басейні. Врахування такої особливості річок, як звивистість, проаналізовано у роботі [2] і буде враховуватись у моделюванні стану забруднення річок у цій статті.

Урахування таких факторів та обмежень має чітке фізичне обґрунтування, однак, у традиційних

методах геостатистики ці фактори не враховуються, оскільки для моделювання використовуються значення в усіх точках навколо шуканої. Отже, *метою роботи* є удосконалення методу геостатистичного аналізу, який міг би коректніше враховувати гідрографічні та топологічні особливості річкових мереж, тим самим реальніше моделюючи стан їх забруднення та зменшуючи помилку інтерполяції експериментальних даних.

### Результати дослідження

Геостатистичні методи інтерполяції засновані 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, і вірогідність [3].

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 вимірених значень в окремих точках [1].

Процес моделювання стану забруднення поверхневих вод ускладнюється тим, що, на відміну від традиційного методу кригінгу, який у моделюванні значення в конкретній точці враховує значення точок, розташованих біля шуканої точки в усіх напрямках, для моделювання стану забруднення поверхневих вод слід враховувати те, що на значення в шуканій точці впливають значення тільки у тих створах, що знаходяться вище за течією річки.

Класичний метод ординарного кригінгу заснований на обчисленні для кожної точки ваг  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . Тоді інтерполятор буде отриманий як зважена сума даних [1]

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

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

Однак, як зазначено вище, класичний метод у разі його застосування для аналізу даних якості річкових вод некоректно враховує напрям течії річки, її звивистість та топологію річкової мережі.

Для нового підходу потрібно обрати відповідне кодування річкової мережі. Є чимало відомих підходів до кодування. Наприклад, у системі 2-ТП (водгосп), яка використовується для державного обліку водокористування в Україні (ї містить підходи до кодування, закладені ще в радянські часи) річки кожного регіону мають багаторівневу структуру. Є річки нульового рівня, які не впадають в жодну іншу річку і впадають одразу у море. Річки першого рівня впадають в річки нульового і т. і. Кодування річки нульового рівня починається з його умовної скороченої назви типу «П.Буг» чи «Дніпро». Кодування приток цієї річки формується із відстаней у кілометрах від гирла річки нульового рівня до місця впадіння у неї певної притоки. Завдяки цій деревоподібній багаторівневій структурі є можливість точно ідентифікувати усі річки. Кодування, яке використовується у системі 2-ТП (водгосп), враховує 7 рівнів приток річок і має 8 секцій: назву головної річки і чотиризначний кілометраж впадіння. Якщо річка є притокою, наприклад, 2-го порядку, тобто притокою притоки головної річки, тоді вона буде містити назву головної річки, кілометраж впадіння у неї притоки 1-го порядку, кілометраж впадіння у цю притоку, а в усіх інших секціях будуть стояти нулі. Приклад фрагменту (початкові секції кодування) відповідної таблиці форми 2-ТП (водгосп) показано на рис. 1.

П.БУГ	0395	0044	0000
-------	------	------	------

Рис. 1. Кодування притоки 2-го порядку р. Південний Буг

Тобто, річка на 44-му кілометрі впадає у річку, яка на 395-му кілометрі впадає у р. Південний Буг. На кожній такій річці ще може бути багато створів спостережень якості води, для кожного з яких також визначається кілометраж — відстань їх місця розташування від гирла річки.

Таке кодування є зручним для розрахунків, тому використаємо його.

Розглянемо типовий приклад.

Річкову мережу кодуємо так, як показано у табл. 1.

Таблиця 1

## Приклад кодування річки та створів спостережень якості води на ній

Головна річка	Кілометраж впадіння, км				Кілометраж створа, км
	у головну річку	у притоку 1-го порядку	у притоку 2-го порядку	у притоку 3-го порядку	
П. Буг	0395	0044	0010	0000	0010
П. Буг	0395	0044	0020	0000	0020
П. Буг	0395	0044	0015	0010	0015
П. Буг	0395	0044	0023	0014	0012
П. Буг	0395	0044	0010	0000	0005

Пропонуємо для зручності автоматизованої обробки даних кілометраж створу спостережень якості води додавати як ще одну річку, тоді табл. 1 перетвориться на таку (табл. 2):

Таблиця 2

## Приклад уніфікованого кодування річки та створів спостережень якості води на ній

Код головної річки	Кілометраж впадіння, км				
	Код 1	Код 2	Код 3	Код 4	Код 5
П. Буг	0395	0044	0010	0010	0000
П. Буг	0395	0044	0020	0020	0000
П. Буг	0395	0044	0015	0010	0015
П. Буг	0395	0044	0023	0014	0012
П. Буг	0395	0044	0010	0005	0000

Стоїть задача відібрати усі створи, які знаходяться вище по течії та на прилеглих притоках для створу, що знаходиться на 10 км на вищезгаданій річці, яка на 44-му кілометрі впадає у річку, яка на 395-му кілометрі впадає у р. Південний Буг.

Введемо такі позначення:

$$S \in \{S_k\}, \quad (2)$$

де  $S$  — це створи, в яких визначаються показники якості води (наприклад, концентрація нафтопродуктів) у річці, які моделюються;  $S_k$  — це створ спостережень з кодом  $k$ , який являє собою множину значень, поданих у табл. 2, тобто код головної річки та кілометраж річки і самого створу на ній.

Позначимо змінною  $k_{i,j}$   $j$ -й код чи частину загального коду (кілометраж)  $i$ -го створу. Наприклад, у табл. 2:  $k_{3,4} = 0010$ ,  $k_{4,5} = 0012$ ,  $k_{1,0} = \text{«П. Буг»}$ . Далі будемо вважати, що всі розрахунки проводяться для заданої великої річки, тобто з єдиним значенням  $k_{i,0}$ , тому будемо аналізувати лише коди зі значеннями  $j > 0$ .

Нехай  $q$  — це номер останнього ненульового коду для створу спостережень, для якого проводиться моделювання даних. Наприклад, у табл. 2 для 1, 2 та 5 створів  $q = 4$ , а для 3 і 4 —  $q = 5$ .

Пропонуємо визначати підмножину створів  $\overset{\cup}{S}$ , розташованих вище по течії річки від заданого, в якого останній у коді ненульовий кілометраж дорівнює  $k_{i,q} = L$ , за таким виразом:

$$\overset{\cup}{S} = \{S_k\}, k = k_{i,j} \Big|_{(L_{i,q} \geq L) \text{ AND } (L_{i,q} = S_{i,j}, j = \overline{1, q-1})}. \quad (3)$$

Це означає, що до цієї підмножини відносяться лише такі створи, в яких кілометраж  $q$ -го коду є більшим або дорівнює заданому, це значить, що ці створи знаходяться далі від гирла на цій же річці або на притоках, які впадають в цю ж річку на цьому кілометрі або вище по течії.

А тоді замість виразу (1) пропонується застосовувати такий:

$$Z(s_0) = \sum_{\overset{\cup}{S}} \lambda_i Z(s_i), i \in \overset{\cup}{S}, \quad (4)$$

в якому метод геостатистичного аналізу застосовується лише до тих точок, які відносяться до підмножини  $\overset{\cup}{S}$ .

Відповідно до математичного апарату геостатистичного аналізу, розв'язок системи рівнянь дає рівняння кригінгу [1, 4]:

$$G \cdot \lambda = g, \quad (5)$$

де  $G$  — це гамма-матриця, яка містить змодельовані значення варіограми для всіх пар опорних точок, з урахуванням відстані між ними, визначеної уздовж усередненої течії річки чи річок, якщо точки знаходяться на різних притоках річкової мережі;  $g$  — це матриця, яка містить змодельовані значення варіограми для кожної пари з опорної точки і шуканої точки [1, 4].

Для розрахунку значень матриць  $G$  та  $g$  потрібно вивчити структуру даних шляхом створення емпіричної варіограми, алгоритм побудови якої у пакеті програм ArcGIS Geostatistical Analyst (США) детально викладений у роботах [1—4].

Після того, як побудовані матриці  $G$  та  $g$ , необхідно знайти значення вектора  $\lambda$ , що містить ваги, які будуть присвоєні вимірним довкола шуканої точки значенням. Для цього виконується проста операція з матричної алгебри і отримується така формула [1, 4]:

$$\lambda = G^{-1} \cdot g. \quad (6)$$

Коли вже є значення ваг, вага кожної точки множиться на вимірне в ній значення. Результати додаються і дають шукане значення для точки за виразом (5). Відстані між створами слід визначати уздовж течії річки, як це запропоновано у роботі [2].

Для моделювання стану забруднення річки з урахуванням напрямку течії річки та напрямку її течії і топології приток вибрано річку Південний Буг на ділянці в районі м. Ладижин, на якій річка має притоки і є достатня кількість створів спостережень якості води для демонстрації застосування покращення методу на конкретному випадку (рис. 2).

Для аналізу враховано 7 створів спостереження: 6 із них використано для моделювання значення концентрації у створі спостереження № 5, після чого здійснено порівняння промодельованого значення із фактичним із застосуванням традиційного методу, що враховує усі створи, та вдосконаленого, а також визначено похибку інтерполяції. Як видно з рис. 1, для знаходження шуканої концентрації варто враховувати концентрацію зі створів спостереження № 1—4 включно, а концентрація зі створу спостереження № 6 не має жодного впливу, оскільки він знаходиться нижче за течією, так само концентрація зі створу спостереження № 7 не впливає на шукане значення, оскільки він знаходиться на притоці нижче за течією річки.

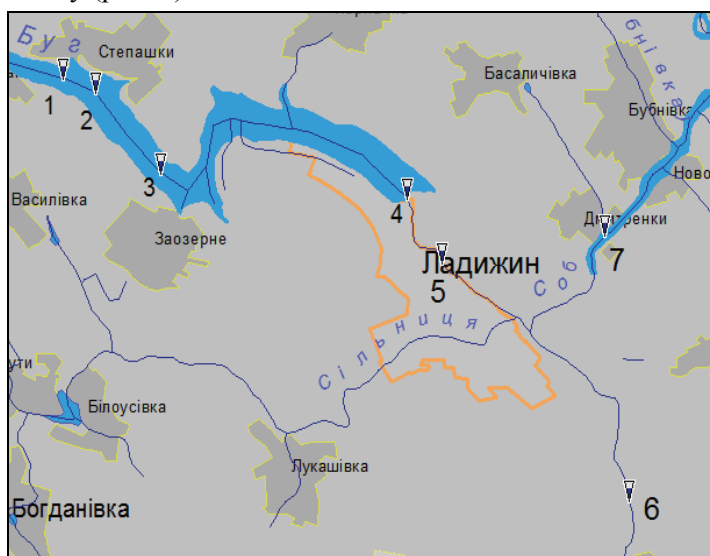


Рис. 2. Ділянка річки Південний Буг та створи спостережень якості поверхневих вод уздовж течії річки та на її притоці

Для аналізу використані дані системи державного моніторингу поверхневих вод за 2002 рік. Аналіз проводився за значеннями концентрації нітратів (табл. 3) згідно з даними державної системи моніторингу довкілля Вінницької області.

Таблиця 3

Створи спостереження та значення концентрацій

№	№ створу спостереження	Концентрація нітратів (NO <sub>3</sub> )
1	38	0,102
2	77	0,239
3	78	0,2435
4	8	0,0355
5	39	0,0735
6	57	0,1207
7	43	0,1042

Проведемо порівняння значення концентрації, отриманої з урахуванням створів спостережень, що знаходяться нижче за течією річки та на притоках нижче за течією річки, та концентрація, отриманої без їх урахування.

Знаходити концентрацію будемо за таким алгоритмом:

1. Визначення відстані між кожною парою створів спостереження якості води (створи 1—7) уздовж течії річки засобами ГІС, а також різниці значень концентрації та значення варіограми (табл. 4).

Таблиця 4

Відстані між створами та відповідні значення варіограми

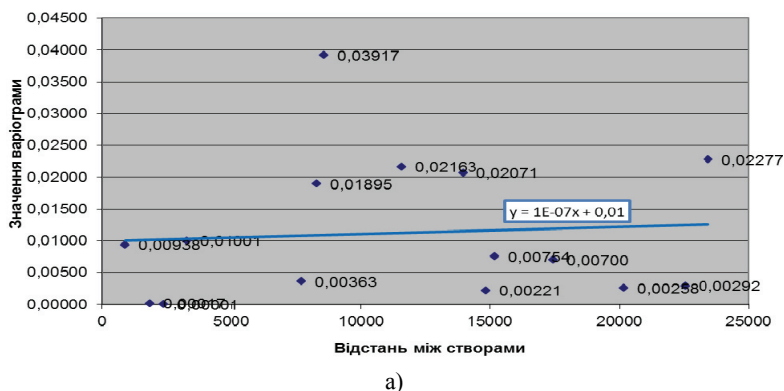
Створи $i\_j$	Відстань між створами	Різниця значень	Значення варіограми
1_2	895	0,137	0,00938
1_3	3257	0,1415	0,01001
1_4	14845	-0,0665	0,00221
1_6	21241	-0,0187	0,00017
1_7	21675	-0,0022	0,00000
2_3	2362	0,0045	0,00001
2_4	13950	-0,2035	0,02071
2_6	20346	0,1183	0,00700
2_7	20780	0,1348	0,00909
3_4	11588	-0,208	0,02163
3_6	17984	0,1228	0,00754
3_7	18418	0,1393	0,00970
4_6	6396	-0,0852	0,00363
4_7	6830	-0,0687	0,00236
6_7	434	0,0165	0,00014

2. Побудова варіограм. Будується варіограми, наприклад, засобами MS Excel. Цей пакет програм ще й зручний тим, що для нього є спеціальні програми автоматизованого імпорту даних з інформаційних систем моніторингу якості поверхневих вод та експорту результатів розрахунків в ці системи для виведення результатів моделювання на електронних картах геоінформаційних систем (рис. 3) [5].

3. Побудова матриць  $G$  та  $g$  і визначення ваг кригінгу.

Результати побудови матриць  $G$ ,  $g$  та ваг кригінгу на основі залежності від відстані між створами, наведені в табл. 5.

Варіограма при врахуванні постів спостереження №6 та №7



Варіограма без врахування постів спостереження №6 та №7

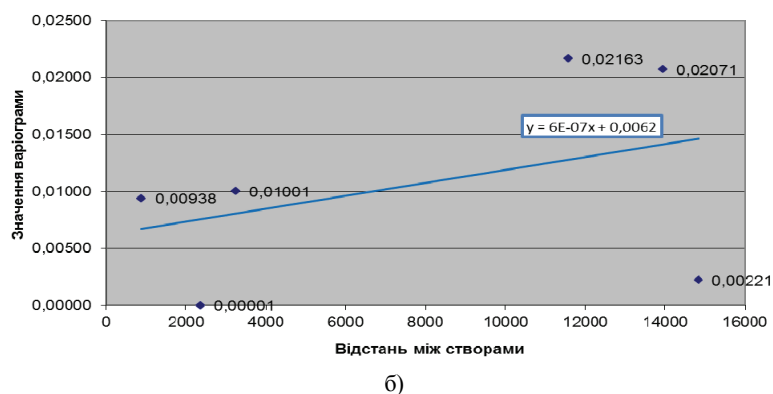


Рис. 3. Побудова варіограм: а — з урахуванням створів спостереження № 6 та № 7; б — без урахування створів спостереження № 6 та № 7

Значення матриць G, g та значення ваг кригінгу

Параметри	Метод 1 (з урахуванням створів № 6 та № 7)	Метод 2 (без урахування створів № 6 та № 7)																																																																																																											
Матриця G	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Матриця G</th> </tr> <tr> <th>№ ств. сп.</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>6</th> <th>7</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0,0100895</td> <td>0,0103257</td> <td>0,01148</td> <td>0,012343</td> <td>0,010184</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,0100895</td> <td>0</td> <td>0,0102362</td> <td>0,0114</td> <td>0,012254</td> <td>0,011745</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,0103257</td> <td>0,0102362</td> <td>0</td> <td>0,01116</td> <td>0,012017</td> <td>0,011518</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0,0114845</td> <td>0,011395</td> <td>0,0111588</td> <td>0</td> <td>0,010859</td> <td>0,010771</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>0,0123431</td> <td>0,0122536</td> <td>0,0120174</td> <td>0,01086</td> <td>0</td> <td>0,01083</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>0,0101835</td> <td>0,0117453</td> <td>0,0115176</td> <td>0,01077</td> <td>0,01083</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Матриця G								№ ств. сп.	1	2	3	4	6	7		1	0	0,0100895	0,0103257	0,01148	0,012343	0,010184	1	2	0,0100895	0	0,0102362	0,0114	0,012254	0,011745	1	3	0,0103257	0,0102362	0	0,01116	0,012017	0,011518	1	4	0,0114845	0,011395	0,0111588	0	0,010859	0,010771	1	6	0,0123431	0,0122536	0,0120174	0,01086	0	0,01083	1	7	0,0101835	0,0117453	0,0115176	0,01077	0,01083	0	1		1	1	1	1	1	1	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">Матриця G</th> </tr> <tr> <th>№ ств. сп.</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0,006737</td> <td>0,0081542</td> <td>0,01511</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,006737</td> <td>0</td> <td>0,0076172</td> <td>0,01457</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,0081542</td> <td>0,0076172</td> <td>0</td> <td>0,01315</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0,015107</td> <td>0,01457</td> <td>0,0131528</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Матриця G					№ ств. сп.	1	2	3	4	1	0	0,006737	0,0081542	0,01511	2	0,006737	0	0,0076172	0,01457	3	0,0081542	0,0076172	0	0,01315	4	0,015107	0,01457	0,0131528	0		1	1	1	1
	Матриця G																																																																																																												
№ ств. сп.	1	2	3	4	6	7																																																																																																							
1	0	0,0100895	0,0103257	0,01148	0,012343	0,010184	1																																																																																																						
2	0,0100895	0	0,0102362	0,0114	0,012254	0,011745	1																																																																																																						
3	0,0103257	0,0102362	0	0,01116	0,012017	0,011518	1																																																																																																						
4	0,0114845	0,011395	0,0111588	0	0,010859	0,010771	1																																																																																																						
6	0,0123431	0,0122536	0,0120174	0,01086	0	0,01083	1																																																																																																						
7	0,0101835	0,0117453	0,0115176	0,01077	0,01083	0	1																																																																																																						
	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																						
Матриця G																																																																																																													
№ ств. сп.	1	2	3	4																																																																																																									
1	0	0,006737	0,0081542	0,01511																																																																																																									
2	0,006737	0	0,0076172	0,01457																																																																																																									
3	0,0081542	0,0076172	0	0,01315																																																																																																									
4	0,015107	0,01457	0,0131528	0																																																																																																									
	1	1	1	1																																																																																																									
Матриця g	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Матриця g</th> </tr> <tr> <th>№ ств. сп.</th> <th>Відстань до т. 5</th> <th colspan="2">g Вектор для т. 5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>15793</td> <td colspan="2">0,00714758</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>14898</td> <td colspan="2">0,00709388</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>12536</td> <td colspan="2">0,00695216</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>948</td> <td colspan="2">0,00625688</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>7638</td> <td colspan="2">0,00665828</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>11486</td> <td colspan="2">0,00688916</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2">1</td> </tr> </tbody> </table>	Матриця g				№ ств. сп.	Відстань до т. 5	g Вектор для т. 5		1	15793	0,00714758		2	14898	0,00709388		3	12536	0,00695216		4	948	0,00625688		6	7638	0,00665828		7	11486	0,00688916				1		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Матриця g</th> </tr> <tr> <th>№ ств. сп.</th> <th>Відстань до т. 5</th> <th colspan="2">g Вектор для т. 5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>15793</td> <td colspan="2">0,0156758</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>14898</td> <td colspan="2">0,0151388</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>12536</td> <td colspan="2">0,0137216</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>948</td> <td colspan="2">0,0067688</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2">1</td> </tr> </tbody> </table>	Матриця g				№ ств. сп.	Відстань до т. 5	g Вектор для т. 5		1	15793	0,0156758		2	14898	0,0151388		3	12536	0,0137216		4	948	0,0067688				1																																												
	Матриця g																																																																																																												
№ ств. сп.	Відстань до т. 5	g Вектор для т. 5																																																																																																											
1	15793	0,00714758																																																																																																											
2	14898	0,00709388																																																																																																											
3	12536	0,00695216																																																																																																											
4	948	0,00625688																																																																																																											
6	7638	0,00665828																																																																																																											
7	11486	0,00688916																																																																																																											
		1																																																																																																											
Матриця g																																																																																																													
№ ств. сп.	Відстань до т. 5	g Вектор для т. 5																																																																																																											
1	15793	0,0156758																																																																																																											
2	14898	0,0151388																																																																																																											
3	12536	0,0137216																																																																																																											
4	948	0,0067688																																																																																																											
		1																																																																																																											
Ваги кригінгу $\lambda$	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Ваги</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0,061574264</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,072240516</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,133415454</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,732769766</td> </tr> </tbody> </table>	Ваги			0,061574264		0,072240516		0,133415454		0,732769766	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Ваги</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0,061574264</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,072240516</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,133415454</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,732769766</td> </tr> </tbody> </table>	Ваги			0,061574264		0,072240516		0,133415454		0,732769766																																																																																							
	Ваги																																																																																																												
	0,061574264																																																																																																												
	0,072240516																																																																																																												
	0,133415454																																																																																																												
	0,732769766																																																																																																												
Ваги																																																																																																													
	0,061574264																																																																																																												
	0,072240516																																																																																																												
	0,133415454																																																																																																												
	0,732769766																																																																																																												

4. Визначення значення концентрації нітратів для створу спостереження № 5 за методом ординарного кригінгу геостатистичного аналізу (табл. 6).

Таблиця 6

Визначення значення концентрації нітратів для створу спостереження № 5

Метод 1 (з урахуванням створів нижче течії річки)				Метод 2 (без урахування створів нижче течії річки)			
№ ств. сп.	Вектор ваг кригінгу $\lambda = G^{-1} \cdot g$			№ ств. сп.	Вектор ваг кригінгу $\lambda = G^{-1} \cdot g$		
	Ваги	Значення конц.	Результат		Ваги	Значення конц.	Результат
1	0,126820962	0,102	0,01293574	1	0,061574264	0,102	0,00628057
2	0,14998169	0,239	0,03584562	2	0,072240516	0,239	0,01726548
3	0,153676638	0,2435	0,03742026	3	0,133415454	0,2435	0,03248666
4	0,212909732	0,0355	0,0075583	4	0,732769766	0,0355	0,02601333
6	0,210794812	0,3154	0,06648468				
7	0,148326148	0,4814	0,07140421				0,08205

Як видно з таблиці, при визначенні концентрації без урахування створів нижче течії річки вага створу № 4 значно більша, ніж при визначенні концентрації з урахуванням створів нижче течії річки.

5. Порівняння отриманого значення з фактичним та оцінювання помилки інтерполяції. Результат порівняння наведено у табл. 7.

Таблиця 7

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

Величини	Значення, отримане при застосуванні методу 1	Значення, отримане при застосуванні методу 2	Фактичне значення
Інтерпольоване значення	0,2317	0,0820	0,0735
Помилка інтерполяції	215 %	11 %	—

Як видно з табл. 5, значення, отримане із застосуванням удосконаленого методу, ближче до фактичного значення на  $215 - 11 = 204$  %.

Зауважимо, що похибка буде збільшуватися, якщо концентрація в створі спостереження, що знаходиться нижче по течії, або на притоці нижче за течією, буде набагато більшою, ніж у створі вище по течії від досліджуваного створу.

Оскільки на перенесення шкідливих речовин впливає багато різних показників, серед яких швидкість течії річки, то зрозуміло, що чим більша швидкість течії, тим і концентрація буде більше змінюватися в різних точках спостереження, а це, в свою чергу, збільшує похибку моделювання, якщо не враховувати напрямок течії річки.

Розроблений метод та технологію було б доцільно автоматизувати та створити Web-систему для спостереження за якістю поверхневих вод, що особливо ефективно за умови, коли б дані спостережень теж були б у цій системі з можливістю їх автоматизованого оновлення із діючих інформаційних систем республіканського рівня [6]. При цьому користувачі мали б можливість отримувати необхідні дані в конкретній точці вздовж річки. З використанням цієї системи користувачі отримували б останні оновлені дані, які регулярно імпортувалися б із автоматичних та автоматизованих станцій моніторингу.

### Висновки

Удосконалено метод та технологію геостатистичного аналізу якості вод річок за рахунок урахування напрямку течії в математичному апараті цієї річки та топології її приток. Це дало можливість зменшити похибку моделювання та отримати коректнішу картину про стан забруднення. Запропонований метод та технологія проілюстровані на прикладі моделювання якості поверхневих вод р. Південний Буг в районі м. Ладижин. Похибку інтерполяції зменшено на більш, як 200 %.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Johnston K. Using ArcGIS Geostatistical Analyst / K. Johnston, J. Ver Hoef, K. Krivoruchko. — USA: ESRI, 2003. — 306 p.
2. Мокін В. Б., Семчук Ю. С., Крижановський Є. М. Удосконалення методу ординарного кригінгу геостатистичного аналізу для моделювання якості вод у річці з урахуванням її звивистості // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 4. — С. 46—51.
3. ArcReview. Современные геоинформационные технологии / глав. ред. А. В. Орлов. — М : Фабрика офсетной печати № 2, 2004. — № 4 (31). — С. 4.
4. Krivoruchko K. Introduction to Modeling Spatial Processes Using Geostatistical Analyst / K. Krivoruchko. — USA: ESRI, 2004. — 245 p.
5. Мокін В. Б. Автоматизація обробки екологічних даних з ГІС з використанням ППП Mathcad / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, А. В. Камінський, // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 2. — С. 42—45.
6. Мокін В. Б. Новий підхід до формалізації та автоматизації обробки схем відбору проб води у підсистемі «Вода та скиди» АСУ «ЕкоІнспектор» Держекоінспекції Мінприроди України [Електронний ресурс] / В. Б. Мокін, М. П. Боцула, А. Р. Яцолт // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. — 2008. — № 2. — Режим доступу до журн : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.htm>.

Рекомендована кафедрою комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки

Стаття надійшла до редакції 23.09.2014

**Яцолт Андрій Русланович** — канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки, e-mail: [yasholt@gmail.com](mailto:yasholt@gmail.com);

**Присяжнюк Юлія Степанівна** — аспірант кафедри комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки;

**Костик Василь Іванович** — здобувач кафедри комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки, e-mail: [Kostykv@gmail.com](mailto:Kostykv@gmail.com);

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**A. R. Yashcholt<sup>1</sup>**  
**Yu. S. Prysiashniuk<sup>1</sup>**  
**V. I. Kostyk<sup>1</sup>**

## Design of quality of waters of the rivers by facilities of geostatistical analysis taking into account direction of their flow, sinuosity and topology inflow

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University

*The modeling of water quality of rivers based on the mathematical tools and the use of geostatistical analysis taking into account the direction of the flow of these rivers, their tortuosity topology and their tributaries is conducted in the paper. The traditional method and decreased error modeling, which allows to increase the accuracy and efficiency calculations is improved.*

**Keywords:** modeling, geostatistical analysis, water quality.

**Yashcholt Andrii R.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Computer Ecological and Economic Monitoring and Engineering Graphics, e-mail: [yasholt@gmail.com](mailto:yasholt@gmail.com);

***Prysiachniuk Yuliya S.*** — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Ecological and Economic Monitoring and Engineering Graphics;

***Kostyk Vasyl I.*** — Researcher of the Chair of Computer Ecological-Economic Monitoring and Engineering Graphics, e-mail: Kostykv@gmail.com

**А. Р. Яцолт<sup>1</sup>**  
**Ю. С. Присяжнюк<sup>1</sup>**  
**В. И. Костик<sup>1</sup>**

## **Моделирование качества вод рек средствами геостатистического анализа с учетом направления их течения, извилистости и топологии приток**

<sup>1</sup> Винницкий национальный технический университет;

*Осуществлено моделирование качества вод рек на основе математического аппарата с использованием средств геостатистического анализа и учетом направления течения этих рек, их извилистости и топологии их притоков. Усовершенствован традиционный метод и уменьшена погрешность моделирования, что позволяет повысить точность и эффективность расчетов*

**Ключевые слова:** моделирование, геостатистический анализ, качество вод.

***Яцолт Андрей Русланович*** — канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерного эколого-экономического мониторинга и инженерной графики, e-mail: yasholt@gmail.com;

***Присяжнюк Юлия Степановна*** — аспирант кафедры компьютерного эколого-экономического мониторинга и инженерной графики;

***Костик Василий Иванович*** — соискатель кафедры компьютерного эколого-экономического мониторинга и инженерной графики, e-mail: Kostykv@gmail.com