

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВИХ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВИЩЕРОЗТАШОВАНИХ ПРИТОКІВ

С. А. Коваленко¹¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

УДК 502.51:502.172

DOI: 10.52363/2522-1892.2024.2.7

Отримано: 14 жовтня 2024

Прийнято: 28 листопада 2024

Cite as: Kovalenko S. (2024). Mathematical model for predicting changes in the ecological state of surface water bodies, taking into account the impact of upstream tributaries. *Technogenic and ecological safety*, 16(2/2024), 46–53. doi: 10.52363/2522-1892.2024.2.7

Анотація

У статті досліджено вплив поверхневих водних об'єктів суббасейнів річки Дніпро, зокрема вплив розташованої вище притоки на екологічний стан нижчерозташованої за течією основної річки. Такі дослідження необхідні для встановлення факторів впливу на склад вод річок і визначення екологічного стану поверхневих водних об'єктів, у тому числі, таких, як ліві притоки Дніпра – Десна, Сула, Псел, Ворскла і Самара. Метою дослідження є визначення впливу лівих приток Дніпра на якість води поверхневих водних об'єктів у межах суббасейнів для визначення основних джерел погіршення їх екологічного стану. Об'єкт дослідження – поверхневі водні об'єкти (ліві притоки Дніпра – річки Десна, Сула, Псел, Ворскла та Самара). Предметом дослідження є вплив вищерозташованих лівих приток Дніпра на розташовані нижче на змїну їх екологічного стану у межах суббасейнів. Наукова новизна полягає у тому, що вперше розроблено математичну модель прогнозування змїни екологічного стану поверхневого водного об'єкту у межах суббасейну з урахуванням впливу всіх притоків. На підставі побудованих ізольованих концентрацій сульфатів та хлоридів доведено, що існує вплив забруднюючих речовин притоки географічно вищерозташованій за течією основної річки на нижчерозташовану притоку. Встановлено, що вплив розташованих вище притоків на нижчерозташовані за постами спостережень описується експоненціальним законом. Побудована математична модель дозволяє прогнозувати вплив вищерозташованих приток на розташовані нижче. Отримані результати розрахунку критерію Колмогорова-Смірнова дозволяють стверджувати, що розроблена модель прогнозування екологічного стану поверхневих водних об'єктів суббасейнів Дніпра є надійною й ефективною та може бути впроваджена під час розрахунків ризику виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру.

Ключові слова: поверхневі водні об'єкти, екологічний стан, басейновий принцип управління, вміст хлоридів та сульфатів, вплив приток на якість води.

1. Постановка проблеми

Неодноразово проводились дослідження екологічного стану поверхневих водних об'єктів басейну Дніпра, під час яких було виявлено тенденцію до погіршення екологічного стану річки Дніпро внаслідок техногенного навантаження. Проте на якість води річки Дніпро додатково впливають притоки, що було показано у попередніх дослідженнях [1].

Живлення ґрунтових вод відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів, фільтрації з річок, озер, каналів, конденсації водяної пари. Під час дощів і весняного сніготанення їх рівень підіймається, а під час посух та взимку – знижуються. Зв'язок із поверхневими водними об'єктами полягає у тому, що ґрунтові води можуть підживлювати поверхневі, а, отже, і бути додатковим джерелом забруднення. Від вмісту води в ґрунті залежить інтенсивність протікання в ній біологічних, хімічних та фізико-хімічних процесів, формування ґрунтового профілю, водно-повітряний, поживний і тепловий режими, її фізико-механічні властивості.

Вміст сульфатів у природних водах змінюється в широких межах і зумовлено вимиванням сульфатвмісних порід або скиданням у водойми промислових і побутових стічних вод. Головним джерелом сульфатів у поверхневих водах є процеси хімічного вивітрювання і розчинення сірковмісних мінералів, в основному гіпсу, а також окислення

сульфідів і сірки. Значні кількості сульфатів надходять у водойми у процесі відмирання організмів, окислення наземних і водних речовин рослинного і тваринного походження і з підземним стоком. Більшість сульфатів добре розчиняються у воді, за винятком сульфату барію ($BaSO_4$), який не розчиняється у воді, сульфату кальцію ($CaSO_4$), сульфату срібла (Ag_2SO_4) та сульфату свинцю ($PbSO_4$) які є малорозчинними. У свою чергу, більшість хлоридів добре розчинні у воді, не є продуктами споживання для біологічних організмів. Одним із джерел потрапляння хлоридів до поверхневих водних об'єктів є станції водопостачання та водовідведення.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нині для вирішення проблем, пов'язаних з управлінням водними ресурсами, необхідний комплексний опис гідрохімічних, гідродинамічних та гідробіологічних процесів у водоймах. Для прогнозування екологічного стану водних об'єктів застосовують методи штучного інтелекту [2], математичні моделі [3, 4] та ін. Роман Пономаренко, Леонід Плячук, Олег Третьяков та ін. у своїх дослідженнях удосконалили математичну модель динаміки інтегральних показників екологічного стану водойми (модель Стрітера-Фелпса) шляхом доповнення коригуючими коефіцієнтами, що дозволяє прогнозувати змїну екологічного стану поверхневого джерела [5]. Модифіковану модель було застосовано

для дослідження басейну Дніпра та Оскільського водосховища. Оленою Данильченко було здійснено оцінку якості води річок Сумської області (р. Бобринь, р. Сейм, р. Знобівка, р. Сумка, р. Охтирка та ін.) та визначено, що згідно з результатами розрахунку індексу забруднення води (ІЗВ) вода характеризується як «чиста», «помірно забруднена» та «забруднена». До IV класу якості належать поверхневі водні об'єкти, які знаходяться під постійним техногенним навантаженням [6]. Валентин Хільчевський, Ірина Нетробчук, Наталія Шерсток та Мирослава Забокрицька використали «Методику екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними критеріями» [7] та методику «Екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями» [8] для визначення якості води басейну Прип'яті [9]. Отримані результати показали, що головними чинниками, які впливають на якість води поверхневих водних об'єктів є: населені пункти, у яких відсутнє централізоване водовідведення; вплив притоки Турія, яка забруднюється господарсько-побутовими стічними водами.

Павлом Ковальчуком та Андрієм Герусом запропоновано математичну модель для оперативного прогнозування якості води в районах водозаборів під час скидів забруднюючих речовин у випадку виникнення аварійних ситуацій, яка базується на системі диференціальних рівнянь взаємодії водотоку з донними відкладами [10]. Дану модель було застосовано на прикладі річки Дністер для прогнозування поширення забруднення від залпового скиду протягом однієї та двох годин. Досить розповсюдженим в Україні та світі є метод моніторингу якості поверхневих вод на основі бази даних геоінформаційних технологій. Олександр Васенко, Володимир Брук, Аліна Карлюк та Юрій Свиридов працювали над створенням геоінформаційної системи екологічного моніторингу для прогнозування зміни якості води у водних об'єктах і яка містить додаткові функції аналізу часових рядів результатів спостережень [11]. Отриману ними систему було застосовано для визначення тенденцій зміни показників якості води на прикладі річки Дунай та Сіверський Донець та виконано прогноз на майбутні роки [11]. Дослідження річки Соб (найбільша лівобережна притока Південного Бугу) Миколою Первачуком та Валерією Рибонькою на основі відібраних проб показали, що притока перебуває під постійним техногенним впливом, тому спостерігається суттєве погіршення якості води [12]. Наталія Лобода, Ярослав Яров та ін. дослідили якість води річки Грузька та Чорний Ташлик на території Кіровоградської області на основі даних відібраних проб та їх порівняння зі значеннями ГДК. Отримані результати показали, що зміна екологічного стану водного об'єкту відбувається внаслідок суттєвого техногенного навантаження, а основним джерелом забруднення є господарсько-побутові стічні води [13, 14].

Науковцями у роботах [15, 16] виявлено, що основними джерелами погіршення екологічного стану річок країн Південної Азії та Південної Америки є промислові підприємства, сільське господарство, проте у дослідженнях не було враховано вплив приток. У

публікації Япінга Янга, Сіджі Танга, Даві Гана та ін. відзначені переваги та недоліки методів моніторингу вод, які застосовують у світі, а також надано рекомендації щодо їх удосконалення [17].

Таким чином, аналіз вітчизняних та зарубіжних літературних джерел показав, що варто звернути увагу на дослідження впливу географічно вищерозташованих приток на екологічний стан розташованих нижче приток.

3. Постановка завдання та його вирішення

Під час проведення попередніх досліджень [18] було висунуто припущення щодо існування впливу географічно вищерозташованих приток на розташовані нижче та було розпочато пошук кореляційних залежностей між концентраціями хлоридів лівих приток Дніпра (Десна, Сула, Псел, Ворскла та Самара) у постах спостереження, які знаходяться найближче до Дніпра, визначалися за даними моніторингу поверхневих вод за 2013, 2016 та 2020 роки.

Метою дослідження є визначення впливу лівих приток Дніпра на якість води поверхневих водних об'єктів у межах суббасейнів для визначення основних джерел погіршення їх екологічного стану.

Для досягнення мети необхідно вирішити завдання:

- дослідити вплив якості вод розташованих вище лівих приток Дніпра на екологічний стан нижчерозташованих на основі ізоляції концентрацій хлоридів та сульфатів та за допомогою кореляційних залежностей між вмістом вказаних речовин;

- розробити математичну модель прогнозування зміни екологічного стану поверхневих водних об'єктів з урахуванням впливу всіх притоків у межах суббасейну.

Об'єкт дослідження – поверхневі водні об'єкти (ліві притоки Дніпра – річки Десна, Сула, Псел, Ворскла та Самара).

Предметом дослідження є вплив вищерозташованих лівих приток Дніпра на розташовані нижче на зміну їх екологічного стану у межах суббасейнів.

Наукова новизна полягає у тому, що *вперше* розроблено математичну модель прогнозування зміни екологічного стану поверхневого водного об'єкту у межах суббасейну з урахуванням впливу вищерозташованих притоків.

Для встановлення наявності внутрішньої течії, яка забезпечує вплив вищерозташованих приток на розташовані нижче було побудовано ізоляції на основі моніторингових даних ДАВР України за вмістом хлоридів і сульфатів у притоках Десна (6 постів спостереження), Сула (4 пости спостереження), Псел (6 постів спостереження) та Ворскла (4 пости спостереження) за допомогою програмного забезпечення для геоінформаційних систем, яке знаходиться у відкритому доступі QGIS (Quantum GIS – <https://www.qgis.org/>). Оскільки річка Самара географічно розташована найнижче з досліджуваних, було прийнято рішення не враховувати їх значення під час побудови ізоляцій концентрацій.

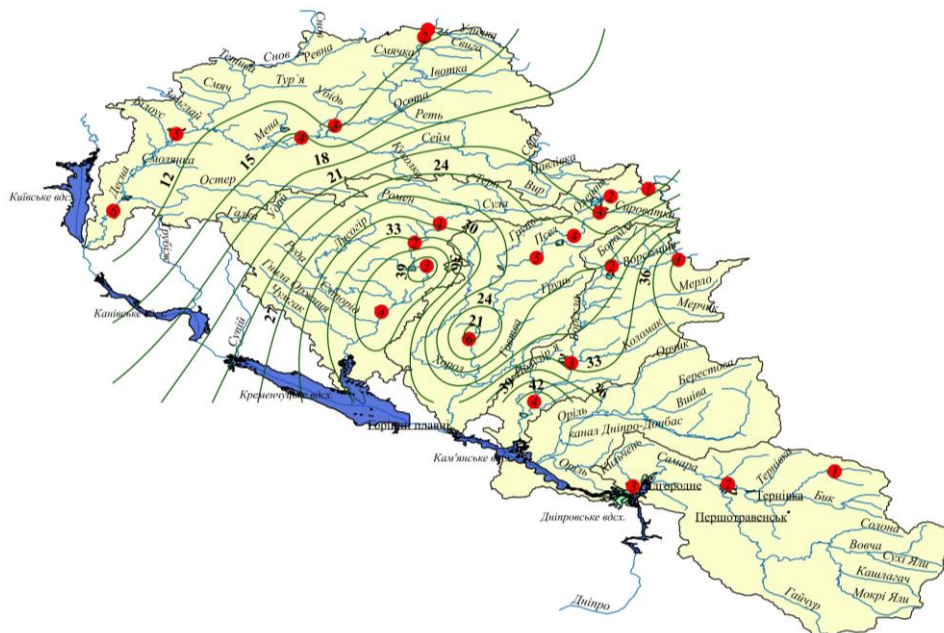


Рисунок 1 – Карта розподілу концентрацій хлоридів (мг/дм^3) у басейнах річок Десна, Сула, Псел та Ворскла станом на 2023 рік

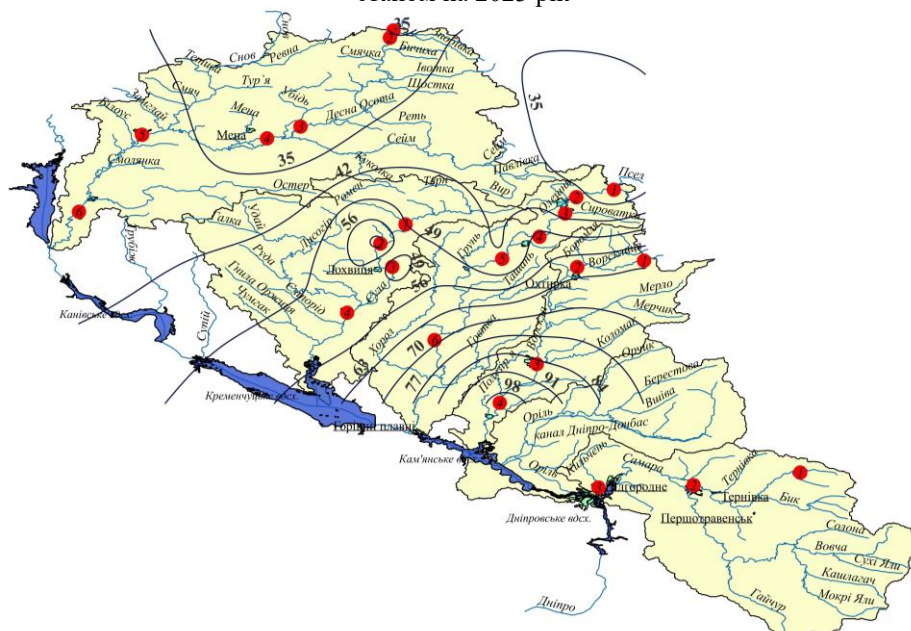


Рисунок 2 – Карта розподілу концентрацій сульфатів (мг/дм^3) у басейнах річок Десна, Сула, Псел та Ворскла станом на 2023 рік

Аналіз результатів розрахунків, наведених на рисунках 1 та 2 показує, що при збільшенні концентрацій хлоридів та сульфатів у вищерозташованих притоках за течією річки Дніпро, спостерігається збільшення їх концентрацій у нижчерозташованих притоках. Зображені ізолінії підтверджують припущення про те, що між притоками існує вплив за рахунок ґрунтових вод, які сприяють зміні концентрації у нижчерозташованій течії в залежності від зміни концентрації у вищерозташованій. Між постами 3 та 4 річки Сула спостерігається суттєве збільшення хлоридів, що може бути обумовлене розташуванням у м. Лубни КП «Лубни водоканал» Лубенської міської ради та СКП «Сяйво» у с. Засуля Лубенського району Полтавської обл., які згідно з екологічним

паспортом Полтавської області є забруднювачами поверхневого водного об'єкту.

Для підтвердження гіпотези було здійснено пошук кореляційних залежностей між вмістом хлоридів, сульфатів вищерозташованих приток на притоки, що розташовані нижче за течією основної річки вздовж приток. Для прикладу на рис. 3–8 зображено кореляційні залежності по хлоридам і сульфатам між притоками за 2023 рік.

Функціональну залежність по концентраціям різноманітних домішок можна виразити за допомогою формули (1)

$$\psi = f(C_i; C_j), \quad (1)$$

де C_i , C_j – це концентрації забруднюючих речовин у різних притоках.

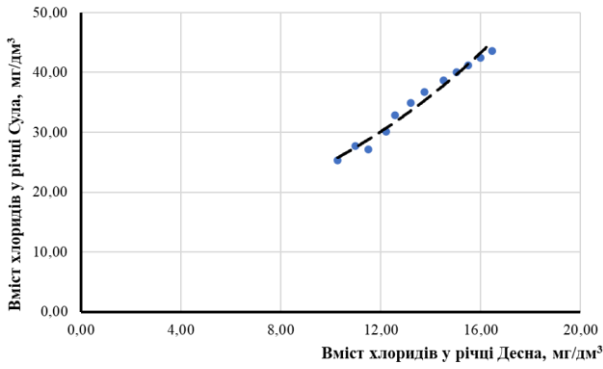


Рисунок 3 – Кореляційна залежність вмісту хлоридів між притоками Десна (пост 3) та Сула (пост 1) за 2023 рік

Регресійне рівняння виявленої залежності
 $y = 10,148e^{0,091x}$, достовірність апроксимації –
 $R^2 = 0,973$.

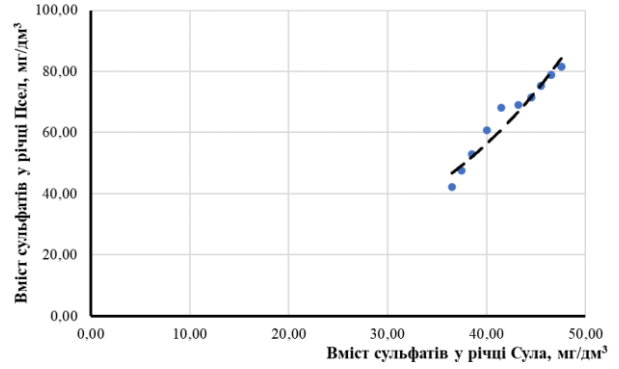


Рисунок 6 – Кореляційна залежність вмісту сульфатів між притоками Сула (пост 3) та Псел (пост 6) за 2023 рік

Регресійне рівняння виявленої залежності
 $y = 6,6643e^{0,0534x}$, достовірність апроксимації –
 $R^2 = 0,9472$.

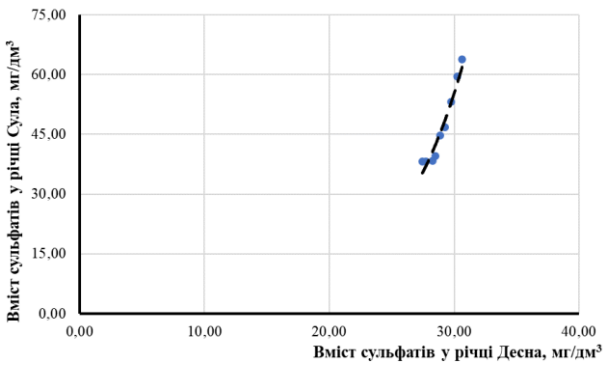


Рисунок 4 – Кореляційна залежність вмісту сульфати між притоками Десна (пост 3) та Сула (пост 1) за 2023 рік

Регресійне рівняння виявленої залежності
 $y = 0,2696e^{0,1775x}$, достовірність апроксимації –
 $R^2 = 0,9604$.

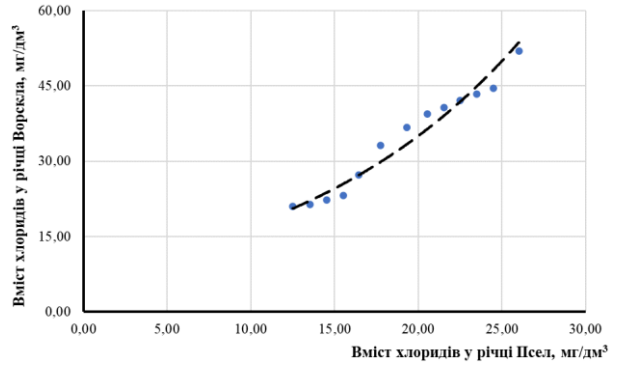


Рисунок 7 – Кореляційна залежність вмісту хлоридів між притоками Псел (пост 6) та Ворскла (пост 4) за 2023 рік

Регресійне рівняння виявленої залежності
 $y = 8,4655e^{0,071x}$, достовірність апроксимації –
 $R^2 = 0,9554$.

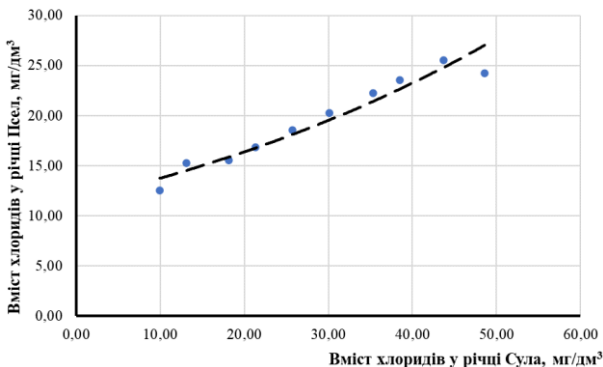


Рисунок 5 – Кореляційна залежність вмісту хлоридів між притоками Сула (пост 3) та Псел (пост 6) за 2023 рік

Регресійне рівняння виявленої залежності
 $y = 11,547e^{0,0175x}$, достовірність апроксимації –
 $R^2 = 0,931$.

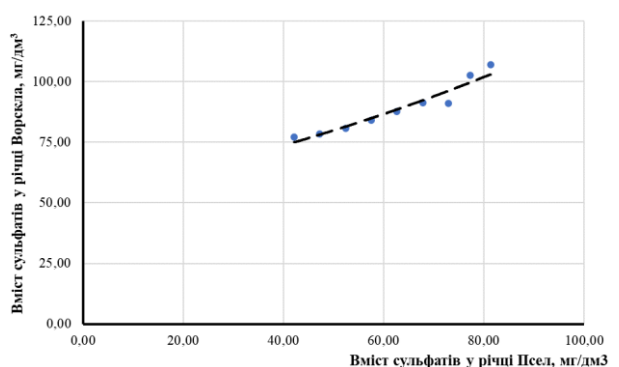


Рисунок 8 – Кореляційна залежність вмісту сульфатів між притоками Псел (пост 6) та Ворскла (пост 4) за 2023 рік

Регресійне рівняння виявленої залежності
 $y = 53,243e^{0,0081x}$, достовірність апроксимації –
 $R^2 = 0,9317$.

Оскільки більшість природніх процесів, таких як інфільтрація, розбавлення вод, самоочищення річки та інші, які можна описати експоненціальним законом, тому процес впливу вищерозташованих приток на розташовані нижче доцільно розглядати на основі саме такої моделі.

Функціональна залежність матиме вигляд (2):

$$y = a \cdot e^{bx}, \quad (2)$$

де a – коефіцієнт, який характеризує вплив геологічної складової, ступінь недоочищеності скидів у місцях протікання приток;

b – коефіцієнт, який характеризує пропускну здатність (проникливість) ґрунтів, яка залежить від складу, структурності, вмісту органічної речовини тощо. Проникливість ґрунту забезпечує пересування води в ґрунті, водопроникність і водопід'ємну здатність та розраховується за формулою (3);

x – фактичне значення концентрації забруднюючої речовини у вищерозташованій притоці, мг/дм³.

$$P_{заг} = (1 - d_v/d) \cdot 100, \quad (3)$$

де d_v – щільність ґрунту, г/см³;

d – щільність твердої фази ґрунту, г/см³.

Для знаходження коефіцієнтів методом найменших квадратів необхідною умовою є те, що сума квадратів відхилень S має бути мінімальною. Для нашого випадку маємо:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2. \quad (4)$$

Нормальна система рівнянь для визначення a і b буде мати вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n [ax_i + b - y_i] \cdot x_i = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n [ax_i + b - y_i] \cdot 1 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Або після перетворень отримуємо:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot n = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (6)$$

Таким чином коефіцієнти знаходимо за формулами (7)–(8):

$$a = \frac{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad (7)$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (8)$$

Під час надходження води у ґрунт спочатку відбувається поглинання і проходження її від одного шару до іншого, ненасиченого водою. Піщані і супіщані ґрунти більш проникні для води, ніж суглинні і глинисті [19].

Згідно з теорією ймовірності та застосування критеріїв перевірки гіпотез про вид статистичного розподілу було обрано критерій Колмогорова-Смірнова (можливо застосувати, у разі якщо кількість спостережень необмежена і невпорядкована) та Шермана (застосування можливе при невпорядкованій вибірці та дисперсних даних вибірки), на відміну від критеріїв Шапіро-Уїлка чи Фішера [20].

Як міра розбіжності між емпіричним і теоретичним законами розподілу вибрано максимальне значення D модуля різниці між емпіричною функцією розподілу $F(x)$ і вибраною теоретичною функцією розподілу $F^T(x)$ за критерієм Колмогорова-Смірнова:

$$D = \max |F^T(x) - F(x)|. \quad (9)$$

Незалежно від вигляду передбачуваної функції розподілу неперервної випадкової величини X у разі необмеженого збільшення кількості незалежних вимірювань n імовірність нерівності $D/\sqrt{n} \leq \lambda$ наближається до межі ймовірності $P(\lambda)$, що дорівнює:

$$P(\lambda) = 1 - \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2 \lambda^2}. \quad (10)$$

Рішення щодо гіпотези про закон розподілу приймають двома способами:

1) якщо для заданої ймовірності P , $\lambda < \lambda(P)$, то приймається гіпотеза про те, що закон розподілу $F(x)$ відповідає обраному $F^T(x)$;

2) за обчисленим значенням λ за формулою (10) визначають імовірність $P(\lambda)$ як імовірність того, що за рахунок випадкових причин максимальна розбіжність між емпіричною і теоретичною функціями розподілу буде не меншою від отриманої за результатами вимірювань. Отже, якщо ймовірність $P(\lambda)$ досить велика, то гіпотезу про відповідність експериментального розподілу $F(x)$ теоретичному $F^T(x)$ слід розглядати як правдоподібну, що не суперечить експериментальним даним [20].

Статистика критерію Шермана визначається за формулою (11)

$$w_n = \frac{1}{2n} \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{x}, \quad (11)$$

де n – кількість спостережень.

Статистика критерію Шермана задовільно апроксимується нормальним розподілом із середнім $M(w_n)$ і дисперсією $D(w_n)$, де

$$M(w_n) = \left(\frac{n}{n+1} \right)^{n+1} \approx \frac{1}{e} = 0,36788; \quad (12)$$

$$D(w_n) = \frac{2n^{n+2} + n(n-1)^{n+2}}{(n+2)(n+1)^{n+2}} \left(\frac{n}{n+2} \right)^{2n+2} \approx \frac{2e-5}{e^2} \frac{1}{n} = \frac{0,05908}{n}. \quad (13)$$

Таким чином, випадкова величина $w^*(n) = \frac{w_n - M(w_n)}{\sqrt{D(w_n)}}$ має стандартний нормальний

розподіл, для якого можна застосувати ефективну нормальну апроксимацію:

$$\tilde{w}_n = u - \frac{0,0955}{\sqrt{n}}(u^2 - 1), \quad (14)$$

$$\text{де } u = \frac{w_n - 0,3679 \cdot \left(1 - \frac{1}{2n}\right)}{0,2431 \sqrt{n} \left(1 - \frac{0,605}{\pi}\right)}$$

За умови $\tilde{w}_n \leq u_p$ з довірчою ймовірністю P гіпотеза експоненційності приймається (u_p – табличне значення). Відтворюваність дослідів було перевірено за критерієм Стьюдента [20]

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}} \leq t(0,05; f_x), \quad (15)$$

де s^2 – дисперсія середніх значень, яка розраховується за формулою (16);

$\bar{x} - \bar{y}$ – різниця середніх значень вибірки;

$t(0,05; f_x)$ – табличне значення критерію

Стьюдента при 5%-му рівні значимості;

$f_x = n - 1$ – число ступенів свободи.

$$s = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^{n_2} (y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 2}. \quad (16)$$

Процес вважається відтворюваним за умови виконання нерівності (15), тоді як будь-яке значення Стьюдента, яке отримано розрахунковим шляхом за даними експериментів, менше його табличного значення.

Результати розрахунків критеріїв Колмогорова-Смірнова, Шермана та Стьюдента для досліджуваних показників представлені в таблицях 1 та 2.

Отримані результати за критерієм Колмогорова-Смірнова та Шермана вказують на те, що показники, що досліджуються відповідають нормальному закону розподілу. Результати розрахунку критерію Стьюдента дозволяють стверджувати, що гіпотеза експоненційності не відхиляється, так як розраховані значення критеріїв менші табличного. Ймовірність того, що процес впливу розташованих вище притоків на нижчерозташовані за постами спостережень можна описати експоненціальним законом складає більше 95 %.

Висновки

На підставі побудованих ізольованих концентрацій сульфатів та хлоридів доведено, що існує вплив забруднюючих речовин притоки географічно

Таблиця 1 – Результати розрахунків критеріїв Колмогорова-Смірнова, Шермана та Стьюдента для хлоридів

Притоки та пости спостереження	Коефіцієнти a та b	Значення критерію Колмогорова-Смірнова (при $P=0,95$, $\lambda(P)=0,52$)	Значення критерію Шермана (при $\alpha=0,95$, $u_p = 0,51595$)	Значення критерію Стьюдента (при $\alpha=0,95$, $t = 1,95996$)
Десна (пост 3) – Сула (пост 1)	$a = 10,148$ $b = 0,091$	0,078	0,214	1,522
Сула (пост 3) – Псел (пост 6)	$a = 11,547$ $b = 0,0175$	0,050	0,101	1,172
Псел (пост 6) – Ворскла (пост 4)	$a = 53,243$ $b = 0,0081$	0,09	0,24	1,651

Таблиця 2 – Результати розрахунків критеріїв Колмогорова-Смірнова, Шермана та Стьюдента для сульфатів

Притоки та пости спостереження	Коефіцієнти a та b	Значення критерію Колмогорова-Смірнова (при $P=0,95$, $\lambda(P)=0,52$)	Значення критерію Шермана (при $\alpha=0,95$, $u_p = 0,51595$)	Значення критерію Стьюдента (при $\alpha=0,95$, $t = 1,95996$)
Десна (пост 3) – Сула (пост 1)	$a = 0,2696$ $b = 0,1775$	0,094	0,182	1,827
Сула (пост 3) – Псел (пост 6)	$a = 6,6643$ $b = 0,0534$	0,092	0,357	1,652
Псел (пост 6) – Ворскла (пост 4)	$a = 8,4655$ $b = 0,071$	0,089	0,396	1,871

вищерозташованій за течією основної річки на нижчерозташовану притоку. Встановлено, що вплив розташованих вище притоків на нижчерозташовані за постами спостережень описується експоненціальним законом.

Побудована математична модель дозволяє прогнозувати вплив вищерозташованих притоків на розташовані нижче. Отримані результати розрахунку критерію Колмогорова-Смірнова та Шермана дозволяють стверджувати, що досліджувані дані відповідають нормальному закону розподілу. Розроблена модель прогнозування екологічного стану поверхневих водних об'єктів суббасейнів Дніпра є надійною й ефективною та може бути впроваджена під час розрахунків ризику виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, оскільки розраховані значення критерію Стьюдента менші за його табличне значення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коваленко С. А., Пономаренко Р. В., Третяков О. В. Вплив якості води лівих приток Дніпра на зміну його екологічного стану. *Молоді вчені 2024 – від теорії до практики: XIV Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених (21 березня 2024 р.)*. Дніпро. 2024. С. 211–214.
2. Assessing and forecasting water quality in the Danube River by using neural network approaches / P.-L. Georgescu et al. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 879. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162998.
3. Волошкіна О. С. Моделі і методи прогнозу забруднення водних ресурсів. *Екологічна безпека та природокористування*. 2014. Вип. 16. С. 5–13.
4. Assessment of urban river water quality using modified NSF water quality index model at Siliguri city, West Bengal, India / S. Parween et al. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2022. Vol. 16. DOI: 10.1016/j.indic.2022.100202.
5. Прогнозування показників кисневого режиму поверхневого джерела в умовах водної екосистеми басейну Дніпра / Р. В. Пономаренко та ін. *Техногенно-екологічна безпека*. 2019. № 7(1/2020). С. 51–56. DOI: 10.5281/zenodo.3780086.
6. Данильченко О. С. Річкові басейни Сумської області: геоекологічний аналіз: монографія. Суми: СумДПУ імені А.С. Макаренка, 2019. 271 с.
7. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / А. В. Гриценко та ін. Харків: УкрНДІП, 2012. 37 с.
8. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / В. Д. Романенко та ін. Київ: Символ-Т, 1998. 28 с.
9. Екологічна оцінка якості поверхневих вод верхів'я басейну Прип'яті в Україні за різними методиками / В. К. Хільчевський та ін. *Journal of Geology, Geography and Geocology*. 2021. Вип. 31(1). С. 71–80. DOI: 10.15421/112207.
10. Ковальчук П. І., Герус А. В. Математичне моделювання та прогнозування поширення забруднень в річках при аварійних ситуаціях. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2013. №1(7). С. 119–123.
11. Прогнозування якості води в річках Дунай та Сіверський Донець за допомогою геоінформаційних технологій / О. Г. Васенко та ін. *World Science*. 2019. №11(51), вип. 1. С. 45–49. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/30112019/6766.
12. Перванчук М. В., Рибонька В. В. Дослідження та оцінка техногенного навантаження на водні екосистеми річки Соб. *Сільське господарство та лісівництво*. 2015. Вип. 2. С. 111–118.
13. Комплексна оцінка антропогенних навантажень та наслідків їх впливу на екологічний стан водних об'єктів (на прикладі річки Грузька Кіровоградської області) / Н. С. Лобода та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. № 31. С. 103–121. DOI: 10.31481/uhmj.31.2023.07.
14. Вовкодав Г. М. Оцінювання якості водних ресурсів (на прикладі річки Чорний Ташлик). *Охорона навколишнього середовища*. 2018. Вип. 3/2018. С. 81–87.
15. Comprehensive index analysis approach for ecological and human health risk assessment of a tributary river in Bangladesh / Pr. Dey Suchi et al. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Issue 13. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e32542.
16. Ecological quality of the Jucusbamaba River, a high Andean urban river in northeastern Peru / M. Angeles et al. *Environmental Advances*. 2024. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.envadv.2024.100584.
17. A comprehensive review on the design and optimization of surface water quality monitoring networks / J. Jiang et al. *Environmental Modelling & Software*. 2020. Vol. 132. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104792.
18. Коваленко С. А. Вплив обміну ґрунтовими водами між притоками на екологічну якість вод поверхневих водних об'єктів. *Техногенно-екологічна безпека*. 2023. № 14(2/2023). С. 98–103. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.2.10.
19. Аверченко В. І., Самойленко Н. М. Ґрунтознавство: навч. посібник. Харків: Мачулін, 2015. 118 с.
20. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посібник / В.С. Єременко, Ю.В. Куц, В.М. Мокійчук, О.В. Самойліченко. Київ: НАУ, 2013. 320 с.

Kovalenko S.**MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING CHANGES IN THE ECOLOGICAL STATE OF SURFACE WATER BODIES, TAKING INTO ACCOUNT THE IMPACT OF UPSTREAM TRIBUTARIES**

The article investigates the impact of surface water bodies in the sub-basins of the Dnipro River, particularly the influence of an upstream tributary on the ecological status of the main downstream river. Such research is essential to identify factors affecting the water composition of rivers and to assess the ecological status of surface water bodies, including left tributaries of the Dnipro, such as the Desna, Sula, Psel, Vorskla, and Samara. The study aims to determine the impact of the left tributaries of the Dnipro on the water quality of surface water bodies within the sub-basins, in order to identify the primary sources of their ecological deterioration. The object of the study is the surface water bodies (the left tributaries of the Dnipro – the Desna, Sula, Psel, Vorskla, and Samara rivers). The subject of the study is the impact of the upstream left tributaries of the Dnipro on the downstream ones on changes in their ecological status within the sub-basins. The scientific novelty lies in the development of a mathematical model for predicting changes in the ecological status of surface water bodies within a sub-basin, taking into account the influence of upstream tributaries. The obtained research results for the Desna, Sula, Psel, Vorskla, and Samara tributaries, based on the constructed isolines, confirm the influence of upstream tributaries on downstream ones at observation posts. It has been established that the influence of upstream tributaries on those located downstream follows an exponential law. The developed mathematical model allows for predicting the impact of upstream tributaries on downstream ones. The results of the Kolmogorov-Smirnov criterion calculations indicate that the proposed model for predicting the ecological status of surface water bodies in the Dnipro sub-basins is reliable and effective and can be implemented in risk assessments for natural and man-made emergency situations.

Key words: surface water bodies, ecological status, basin management principle, chloride and sulphate content, impact of tributaries on water quality.

REFERENCES

1. Kovalenko, S. A., Ponomarenko, R. V., & Tretiakov, O. V. (2024). Vplyv yakosti vody livykh prytok Dnipra na zminu yoho ekolohichnoho stanu [Influence of water quality of left tributaries of the Dnipro on changes in its ecological state]. *Molodi vcheni 2024 – vid teorii do praktyky: KHIV Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh*, 211–214. Dnipro. [in Ukrainian]
2. Georgescu, P.-L., Moldovanu, S., Iticescu, C., Calmuc, M., Calmuc, V., Topa, C., & Moraru, L. (2023). Assessing and forecasting water quality in the Danube River by using neural network approaches. *Science of the Total Environment*, 879. 1–14. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162998.
3. Voloshyna, O.S. (2014). Modeli i metody prohnozu zabrudnennia vodnykh resursiv [Models and methods of water pollution forecasting]. *Environmental safety and natural resources*, 16. 5–13. [in Ukrainian]
4. Parween, S., Siddique, N. A., Diganta, M. T. M., Olbert, A. I., & Uddin, Md G. (2022). Assessment of urban river water quality using modified NSF water quality index model at Siliguri city, West Bengal, India. *Environmental and Sustainability Indicators*, 16. DOI: 10.1016/j.indic.2022.100202.

5. Ponomarenko, R., Plyatsuk, L., Tretyakov, O., Cherkashyn, O., & Zat'ko, J. (2020). Prohnozuvannya pokaznykiv kysnevoho rezhymu poverkhnivoho dzherela v umovakh vodnoi ekosystemy baseinu Dnipro [Forecasting of oxygen mode of surface sources in conditions of the water ecosystem of the Dnipro basin]. *Technogenic and ecological safety*, 7(1/2020), 51–56. DOI: 10.5281/zenodo.378008. [in Ukrainian]
6. Danylchenko, O. S. (2019). *Richkovi baseiny Sumskoi oblasti: heoekologichnyi analiz: monohrafiia* [River basins of Sumy region: geoeological analysis: monograph]. Sumy, SumDPU imeni A.S. Makarenka. [in Ukrainian]
7. Hrytsenko, A. V., Vasenko, O. H., Vernichenko, H. A., Kovalenko, M. S., Poddashkin, O. V., Vernychenko-Tsvetkov, D. Iu., Melnykova, N. V., & Miroshnychenko, O. P. (2012). *Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnivoho vod za vidpovidnymi katehoriiami* [Methodology of environmental assessment of surface water quality by relevant categories]. Kharkiv, UkrNDIEP. [in Ukrainian]
8. Romanenko, V. D., Zhukynskyi, V. M., Oksiuk, O. P., Yatsyk, A. V., & Cherniavska, A. P. (1998). *Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnivoho vod za vidpovidnymi katehoriiami* [Methodology of environmental assessment of surface water quality by relevant categories]. Kyiv, Symvol-T. [in Ukrainian]
9. Khilchevskiy, V., Netrobchuk, I., Sherstyuk, N., & Zabokrytska, M. (2022). Ekolohichna otsinka yakosti poverkhnivoho vod verkhivya baseinu Prypiati v Ukraini za riznymi metodykami [Environmental assessment of the quality of surface waters in the upper reaches of the Pripjat basin in Ukraine using different methods]. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 31(1), 71–80. DOI: 10.15421/112207. [in Ukrainian]
10. Kovalchuk, P. I., & Herus, A. V. (2013). Matematychni modeliuvannya ta prohnozuvannya poshyrennia zabrudnen v richkakh pry avariynnykh sytuatsiiah [Mathematical modelling and forecasting of the spread of pollution in rivers in emergency situations]. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 1(7), 119–123. [in Ukrainian]
11. Vasenko, O. H., Bruk, V. V., Karliuk, A. A., & Svyrydov, Yu. V. (2019). Prohnozuvannya yakosti vody v richkakh Dunai ta Siverskyi Donets za dopomohoiu heoinformatsiynykh tekhnolohii [Prohnozuvannya yakosti vody v richkakh Dunai ta Siverskyi Donets za dopomohoiu heoinformatsiynykh tekhnolohii]. *World Science*, 11(51), 1. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/30112019/6766. [in Ukrainian]
12. Pervanchuk, M. V., & Rybonka, V. V. (2015). Doslidzhennia ta otsinka tekhnohennoho navantazhennia na vodni ekosystemy richky Sob [Research and assessment of technogenic load on aquatic ecosystems of the Sob river]. *Agriculture and Forestry*, 2, 111–118. [in Ukrainian]
13. Loboda, N. S., Yarov, Y. S., Kuza, A. M., & Katynska, I. V. (2023). Kompleksna otsinka antropohennykh navantazhen ta naslidkiv yikh vplyvu na ekolohichnyi stan vodnykh ob'ektiv (na przykladi richky Hruzka Kirovohradskoi oblasti) [Comprehensive assessment of anthropogenic loads and consequences of their influence on the environmental state of water bodies (as exemplified by the Gruzka River, Kirovohrad Region)]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 31, 103–121. DOI: 10.31481/uhmj.31.2023.07. [in Ukrainian]
14. Vovkodav, H. M. (2018). Otsiniuvannya yakosti vodnykh resursiv (na przykladi richky Chornyi Tashlyk) [Assessment of the quality of water resources (on the example of the Black Tashlyk River)]. *Environmental protection*, 3/2018, 81–87. [in Ukrainian]
15. Dey Suchi, Pr., Shaikha, Md A. A., Sahaa, B., Moniruzzamana, M., Hossaina, Md K., Afroza Parvina, A., & Parvin, A. (2024). Comprehensive index analysis approach for ecological and human health risk assessment of a tributary river in Bangladesh. *Helioyn*, 10(13). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e32542.
16. Angeles, M., Altamirano, J.C., Juarez-Contreras, L., Vela, E. Ch., García, J. F., & Rascón, J. (2024). Ecological quality of the Jucusbamaba River, a high Andean urban river in northeastern Peru. *Environmental Advances*, 17. DOI: 10.1016/j.envadv.2024.100584.
17. Jiang, J., Tang, S., Han, D., Fu, G., Solomatine, D., & Zheng, Y. (2020). A comprehensive review on the design and optimization of surface water quality monitoring networks. *Environmental Modelling & Software*, 132. DOI: j.envsoft.2020.104792.
18. Kovalenko, S. (2023). Vplyv obminu gruntovymy vodamy mizh prytokamy na ekolohichnu yakist vod poverkhnivoho vodnykh ob'ektiv [Influence on groundwater exchange between confluents on the ecological quality of surface water bodies]. *Technogenic and ecological safety*, 14(2/2023), 98–103. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.2.10. [in Ukrainian]
19. Averchenko, V. I., & Samoilenko, N. M. (2015). *Gruntoznavstvo: navch. posibnyk* [Soil science: study manual]. Kharkiv, Machulin. [in Ukrainian]
20. Yeremenko, V. S., Kuts, Yu. V., Mokiichuk, V. M., & Samoilichenko, O. V. (2013). *Statystychnyi analiz danykh vymiriuvan: navch. posibnyk* [Statistical analysis of measurement data: manual]. Kyiv, NAU. [in Ukrainian]