

Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Скиба Г.В.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРОЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ РІЧКИ ТЕТЕРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОЇ МОДЕЛІ СТРІТЕРА-ФЕЛПСА

Розроблено та верифіковано автоматизовану систему прогнозування гідроекологічного стану річки Тетерів на основі інтегральної модифікації моделі Стрітера-Фелпса з урахуванням специфіки урбанізованих річкових систем. Дослідження проводилось на ділянці річки Тетерів у межах м. Житомир довжиною 12,5 км з використанням ретроспективних даних гідрохімічного моніторингу за 2019-2023 роки. Програмний модуль, реалізований у середовищі Jupyter Notebook з використанням Python, забезпечує автоматизовану обробку вхідних даних, розрахунок коефіцієнтів реакції та деградації органічних речовин, побудову прогностичних моделей динаміки біохімічного споживання кисню та концентрації розчиненого кисню. Верифікація моделі підтвердила високу точність прогнозування з коефіцієнтом детермінації $R^2=0.89$ для БСК₅ та середньоквадратичним відхиленням ± 0.2 мг/л для розчиненого кисню. Прогностичні сценарії до 2045 року засвідчують потенційне покращення екологічного стану річки: підвищення концентрації розчиненого кисню з 9.0 до 11.0 мг/л та зниження БСК₅ з 4.4 до 3.2 мг О₂/л, що свідчить про активізацію процесів самоочищення та екологічної реабілітації водної екосистеми в умовах урбанізованого ландшафту.

Ключові слова: забруднення, гідроекологічне прогнозування, автоматизована система, річка Тетерів, урбанізація, водні об'єкти.

Вступ. Прогресуюча деградація водних екосистем під впливом урбанізації становить одну з найгостріших екологічних проблем сучасності. Річкові системи урбанізованих територій, які виступають індикаторами екологічного стану регіону та формують базис гідрологічної мережі, характеризуються підвищеною вразливістю до антропогенного впливу через порушення природних процесів самоочищення та трансформацію гідрохімічного режиму. Класичні застосування моделі Стрітера-Фелпса демонструють значні обмеження при моделюванні урбанізованих річок, що характеризуються складним розподілом джерел забруднення та інтенсивними змінами землекористування.

Імплементация автоматизованих систем прогнозування на основі модифікованих класичних моделей відкриває нові можливості для превентивного екологічного менеджменту та розробки науково обґрунтованих програм ревіталізації деградованих водних об'єктів. Розробка інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень з інтегрованими можливостями гідроекологічного прогнозування представляє парадигматичний зсув до адаптивних рамок управління, необхідних для сталого розвитку урбанізованих територій. Практичне значення розробки автоматизованих модулів гідроекологічного прогнозування поширюється на пряме застосування в управлінні річковими басейнами, екологічному регулюванні та плануванні відновлення екосистем.

Мета дослідження: розробка та верифікація автоматизованої системи прогнозування гідроекологічного стану річкових систем урбанізованих територій на основі інтегральної модифікації моделі Стрітера-Фелпса для оптимізації процесів екологічної реабілітації порушених водних екосистем.

Аналіз виконаних досліджень за означеною темою. Розвиток математичних методів прогнозування екологічного стану водних об'єктів має тривалу історію досліджень. Фундаментальні роботи Х.В. Стрітера та Е.Б. Фелпса започаткували моделювання кисневого режиму річок, що стало базисом для подальших досліджень [1, с. 336]. Подальші наукові розробки значно розширили можливості класичної моделі: Фан та співавтори інтегрували її з гідравлічними характеристиками, розрахованими в системі HEC-RAS [2, с. 640], Аріфін та співавтори оцінили вплив побутових сірих вод на концентрацію розчиненого кисню у дренажних системах з використанням моделі Стрітера-Фелпса [3, с. 311], а Парк і Лі адаптували існуючі моделі для специфічних умов урбанізованих територій [4, с. 67]. Кокс провів ґрунтовний аналіз застосовності різних моделей для симуляції розчиненого кисню в річках [1, с. 338].

Сучасний інструментарій математичного моделювання водних екосистем представлений потужними програмними комплексами, такими як MONERIS, QUAL2K,

WASP, HEC-RAS та MIKE 11. Проте базова модель Стрітера-Фелпса залишається фундаментальною основою для більшості сучасних моделей якості води завдяки її простоті, надійності та можливості модифікації під конкретні умови. Як зазначає Рауш та співавтори, саме ця модель забезпечує оптимальний баланс між складністю розрахунків та достовірністю прогнозів для більшості практичних завдань управління якістю водних ресурсів [5, с. 239].

Спеціалізовані дослідження урбанізованих річкових систем України демонструють актуальність застосування модифікованих підходів до гідроекологічного прогнозування. Циганенко-Дзюбенко І. та співавтори провели комплексну оцінку евтрофікаційного потенціалу річок Тетерів та Кам'янка [6], що створило базис для розуміння специфіки урбанізованих малих річок. Подальші дослідження цих авторів розширили методичну базу: аналітична оцінка полі елементного розподілу важких металів у компонентах урбанізованих гідроекосистем виявила особливості просторової диференціації та міграційних патернів [7]. Капеліста І. та колеги розробили інноваційні підходи до сталого використання природних ресурсів України [8], що актуалізує потребу в удосконаленні систем екологічного моніторингу.

Антропогенні детермінанти деградації гідрохімічних показників водних об'єктів, детально проаналізовані Кірейцевою Г. та колегами [9], підкреслюють необхідність розробки превентивних систем прогнозування. Особливості планування та реалізації моніторингу малих річок в умовах урбанізації та військових дій [10] формують специфічні вимоги до автоматизованих систем оцінки екологічного стану. Методичні підходи до визначення та прогнозування вмісту есенціальних важких металів у поверхневих водах урбанізованих ділянок річки Тетерів [11] забезпечують комплексність гідрохімічного аналізу. GAP-аналіз водокористування у контексті запобігання евтрофікації річки Тетерів [12] демонструє практичне значення розробки інтегрованих систем прогнозування для екологічного менеджменту урбоєкосистем.

Теоретичні основи узагальнених моделей Стрітера-Фелпса отримали значний розвиток у працях Рінальді С. та Сончіні-Сесса Р. У своїх дослідженнях автори демонструють ефективність узагальнених моделей для прогнозування БСК та РК у річкових системах [13], розвивають теорію чутливості для прогнозування варіацій БСК [14] та розробляють метод оцінки параметрів узагальнених моделей якості річок [15]. Їхні роботи значно розширюють можливості застосування моделей Стрітера-Фелпса в умовах обмеженості даних моніторингу та дозволяють більш точно оцінювати параметри моделі для прогнозування якості води в річкових системах.

Практичні аспекти застосування та модифікації моделі демонструють широкий спектр сучасних досліджень. Аріфін Атїра та колеги застосували модель для оцінки впливу побутових сірих вод на концентрацію розчиненого кисню у дренажній системі [2]. Моура Л.С. та інші досліджували мікро-водозбір Урумари, де модель Стрітера-Фелпса показала найкращу кореляцію з експериментальними даними зі значеннями $R^2 = 0,83$ [16]. Мелендес Маза Енді Х. та співавтори провели валідацію моделі з високою точністю підгонки (0,97) [17], а Лонг Б.Т. розробив обернений алгоритм для визначення навантажувальної здатності водного забруднення [18].

Інтеграція моделі Стрітера-Фелпса з сучасними гідравлічними моделями демонструє перспективні напрями розвитку. Тайванські вчені Фань Ч. та інші об'єднали модифіковане рівняння Стрітера-Фелпса та HEC-RAS для оцінки якості води річки Тан-Суй в умовах приливів [3]. Ці дослідження підтверджують ефективність інтегрованих підходів для моделювання якості води в різних гідрологічних умовах.

Для аналізу було використано дані з онлайн платформи "Land & Water" - це агро-гідрологічна модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), що налаштована для відтворення гідрологічних процесів річкових басейнів України. Розробником є Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України (лабораторія моделювання річкових систем).

Гідрологічний режим басейну річки Тетерів характеризується значною мінливістю у просторово-часовому вимірі, що зумовлено як природними чинниками, так і антропогенним впливом. Дослідження цих водних об'єктів є важливим для розуміння трансформації стоку та прогнозування водозабезпеченості регіону. Аналіз компонентної структури стоку

досліджуваних річок дозволяє встановити особливості формування режиму стоку та оцінити вплив різних факторів на гідрологічні процеси.

Аналізуючи динаміку компонентів шару стоку річки Тетерів (рис. 1), слід відзначити, що для цієї річки також характерне переважання поверхневого стоку у загальній структурі. Максимальні значення поверхневого стоку досягають 65 мм у найбільш водні періоди. Внутрішньо ґрунтовий стік та ґрунтовий стік обох горизонтів демонструють такі самі закономірності розподілу в часі, як і річка Кам'янка, проте із меншими показниками максимальних значень. Це свідчить про більшу частку поверхневого живлення у формуванні загального стоку річки Тетерів. Компаративний аналіз компонентної структури стоку обох річок дозволяє стверджувати про схожі механізми формування стоку, що є закономірним, враховуючи, що річка Кам'янка є притокою р. Тетерів. Однак, спостерігаються певні відмінності у кількісних показниках, що зумовлено локальними особливостями водозборів.

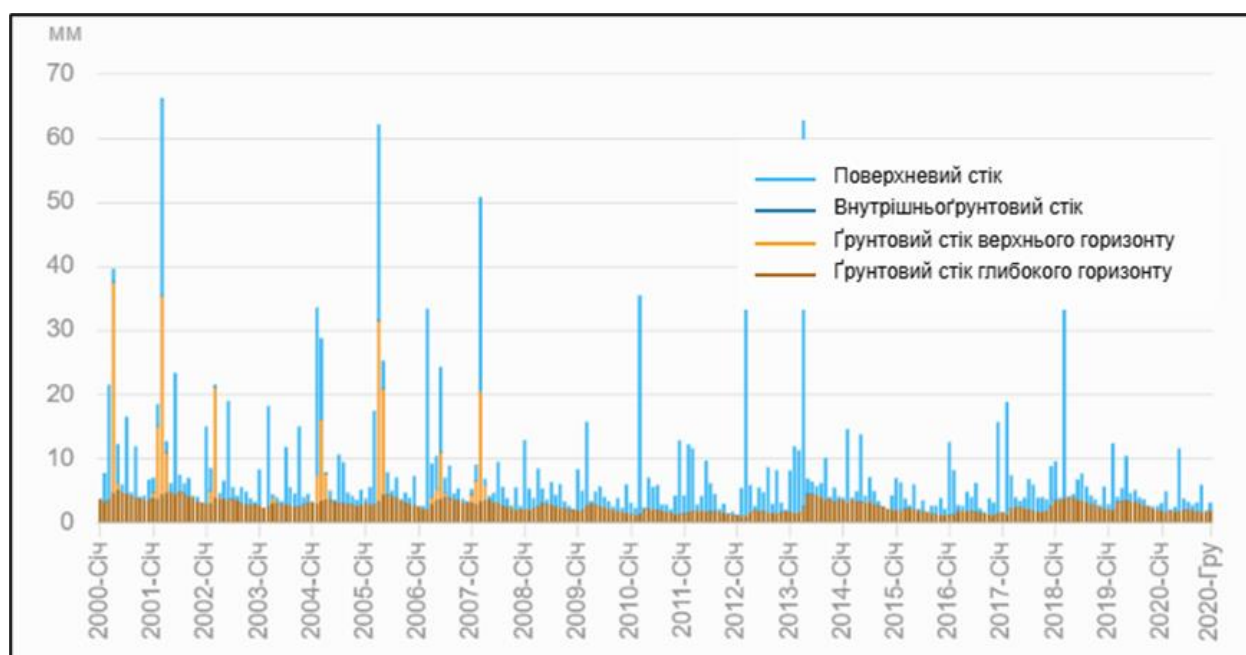


Рис. 1. Динаміка компонентів шару стоку річки Тетерів, 2000-2020 рр.

Водний баланс є інтегральною характеристикою гідрологічного циклу, що відображає співвідношення між основними компонентами кругообігу води у межах водозбору. Водний баланс річки Тетерів (рис. 2) характеризується наступними середньобагаторічними показниками за період 2000-2020 рр.: опади становлять $665 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$, з яких $459 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$ витрачається на випаровування та транспірацію, а потенційна евапотранспірація досягає $715 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$.

Поверхневий стік складає $52 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$, що є досить високим показником, тоді як внутрішньоґрунтовий стік становить лише $1 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$. Інфільтрація та перерозподіл вологи у ґрунті демонструють наступні закономірності: $156 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$ просочується у неглибокий водоносний горизонт, з якого $120 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$ випаровується. Ґрунтовий стік неглибокого горизонту становить лише $10 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$, а глибокого — $32 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$, при цьому живлення глибоководного горизонту відбувається на рівні $30 \text{ мм} \cdot \text{рік}^{-1}$. Такий розподіл свідчить про переважання поверхневого стоку у формуванні загального стоку річки.

Різні компоненти водного балансу безпосередньо впливають на процеси розбавлення забруднюючих речовин, самоочищення та насичення води киснем. Ці особливості мають бути враховані при калібруванні коефіцієнтів реаерації та біохімічного споживання кисню у моделі Стрітера-Фелпса для забезпечення достовірного прогнозування екологічного стану досліджуваних річкових систем в умовах мінливості гідрологічного режиму та антропогенного навантаження.

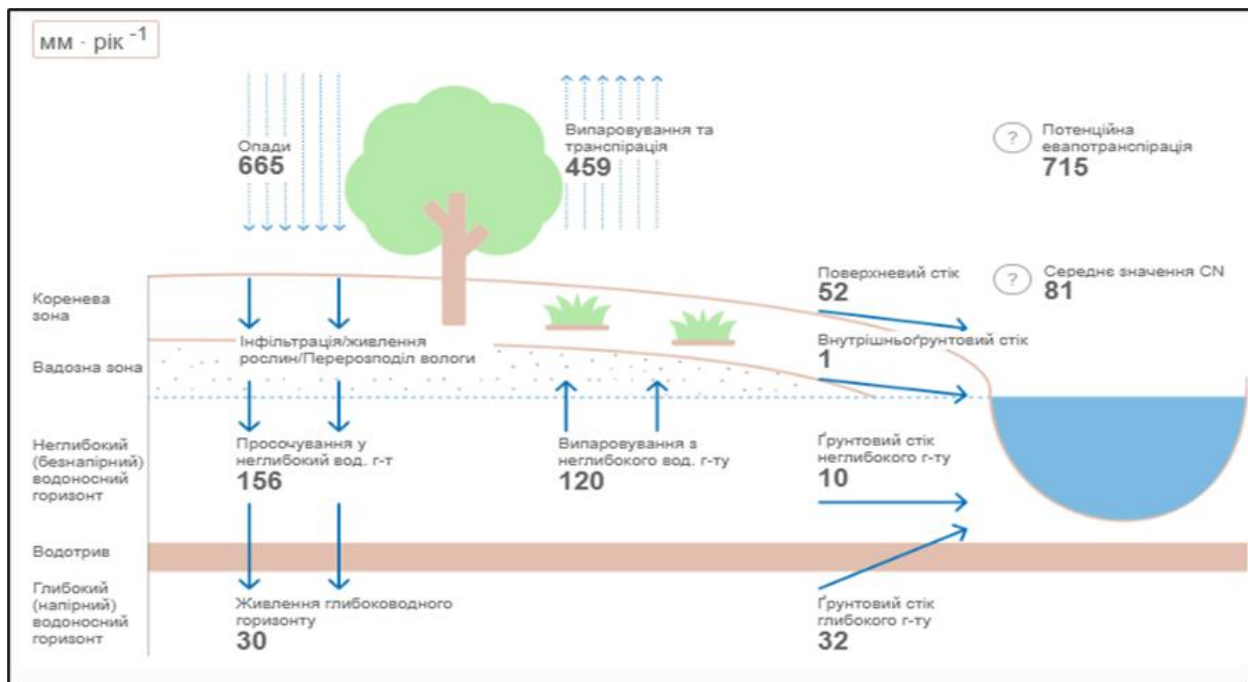


Рис. 2. Водний баланс річки Тетерів, 2000-2020 рр.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводилось на території урбоєкосистеми міста Житомир, зокрема в межах басейну річки Тетерів (рис. 3). Довжина досліджуваної ділянки річки Тетерів у межах міста становить 12,5 км. Ретроспективні дані щодо гідрохімічних показників (біохімічне споживання кисню (БСК₅) та концентрація розчиненого кисню) за період 2019-2023 рр. були надані Басейновим управлінням водних ресурсів річки Прип'ять.

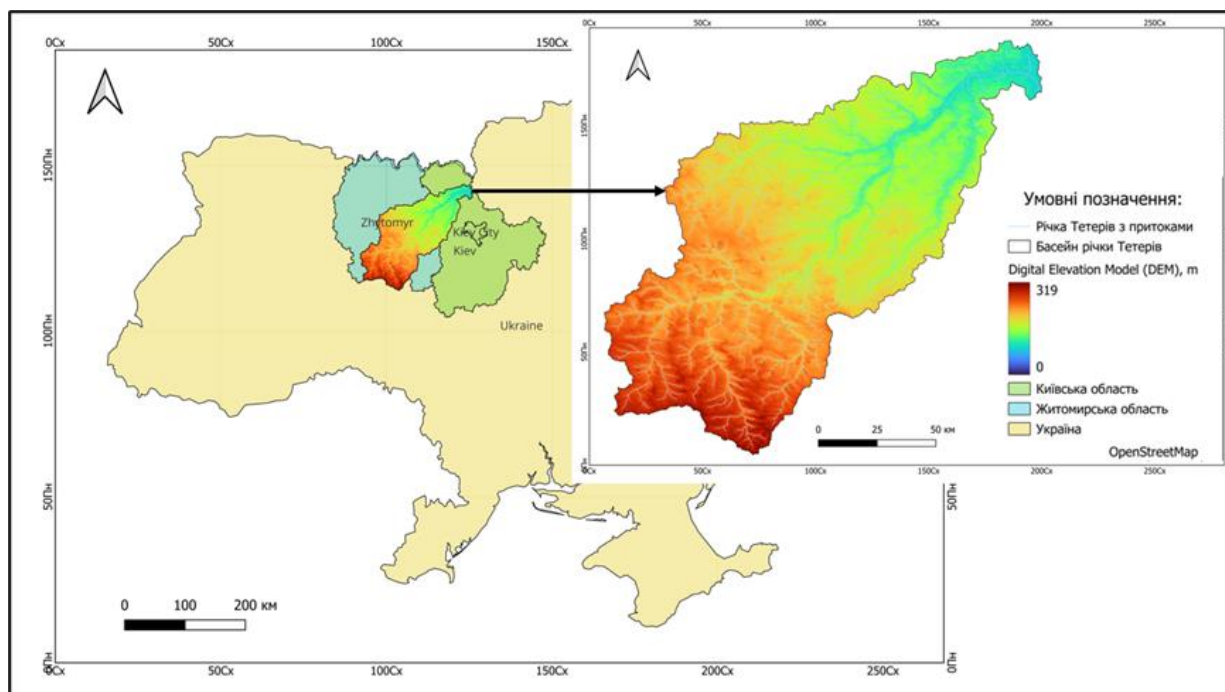


Рис. 3. Геопросторова локалізація басейну річки Тетерів із інтегрованою SRTM DEM моделлю водозбірної території

Основою для розробки прогностичної моделі слугувала класична модель Стрітера-Фелпса [1, с. 336], яка описує взаємозв'язок між концентрацією розчиненого кисню (DO) та біохімічним споживанням кисню (BOD) у річковій системі. Дане рівняння визначає

залежність між концентрацією розчиненого кисню і біохімічним споживанням кисню (БСК) протягом часу та є розв'язком лінійного диференціального рівняння першого порядку [1, с. 336].

Якість і стан води у поверхневих водних об'єктах залежить від концентрації розчиненого в ній кисню. Завдяки своїм властивостям кисень інтенсифікує процеси самоочищення, фізико-хімічної трансформації та гідробіологічного кругообігу речовин.

Основою для дослідження диференціальних рівнянь в процесі математичного моделювання прогностичної моделі слугувала класична модель Стрітера-Фелпса, яка описує взаємозв'язок між концентрацією розчиненого кисню (DO) та біохімічним споживанням кисню (BOD) у річковій системі. Цей процес характеризується двома диференціальними рівняннями першого порядку.

Розкладання відходів відбувається під впливом бактерій, що викликають хімічну реакцію з використанням розчиненого у воді кисню. Якщо концентрацію органічної речовини позначити – $L(t)$, то швидкість її розкладання описується диференціальним рівнянням з відокремлюваними змінними:

$$\frac{dL}{dt} = -k_1 L \quad (1)$$

Знайдемо його розв'язок за схемою:

$$\int \frac{dL}{L} = -k_1 \int dt$$

$$\ln |L| = -k_1 t + C$$

$$L = e^{-k_1 t + C} = e^{-k_1 t} \cdot e^C = L_\alpha e^{-k_1 t}$$

Коефіцієнт L_α визначається експериментальним шляхом.

Якщо дефіцит кисню позначити D , то динаміка дефіциту кисню описується лінійним диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D \quad (2)$$

Застосовуючи стандартний метод розв'язування лінійних диференціальних рівнянь першого порядку, виконаємо заміну:

$$D = uv, D' = u'v + uv'.$$

Отримаємо:

$$u'v + uv' = k_1 L - k_2 uv$$

$$u'v + u(v' + k_2 v) = k_1 L$$

$$v' + k_2 v = 0$$

$$\frac{dv}{dt} = -k_2 v$$

$$\int \frac{dv}{v} = -k_2 \int dt$$

$$\ln |v| = -k_2 t$$

$$v = e^{-k_2 t}$$

$$u' e^{-k_2 t} = k_1 L$$

Враховуючи розв'язок рівняння (1), маємо:

$$\frac{du}{dt} e^{-k_2 t} = k_1 L_\alpha e^{-k_1 t}$$

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= k_1 L_\alpha e^{(k_2 - k_1)t} \\ \int du &= k_1 L_\alpha \int e^{(k_2 - k_1)t} dt \\ u &= \frac{k_1 L_\alpha}{k_2 - k_1} e^{(k_2 - k_1)t} + C \\ D = uv &= \left(\frac{k_1 L_\alpha}{k_2 - k_1} e^{(k_2 - k_1)t} + C \right) \cdot e^{-k_2 t} \\ D &= \frac{k_1 L_\alpha}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} + C e^{-k_2 t}\end{aligned}$$

Слід зазначити, що рівняння (2) має безліч розв'язків. Тому для опису конкретного процесу задаються початкові умови (умови однозначності). Крім того, невідома величина t може інтерпретуватися як тривалість протікання процесу на ділянці довжиною x при швидкості течії v ($t = \frac{x}{v}$).

Таким чином, маємо аналітичний розв'язок у вигляді:

$$\begin{aligned}L &= L_\alpha e^{-k_1 t} \\ D &= \frac{k_1 L_\alpha}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_\alpha e^{-k_2 t},\end{aligned}$$

де: L – швидкість розкладання органічної речовини у воді, також є відомим як граничне БСК (БСК в момент часу $t = \infty$). Одиниця виміру $L \in \frac{g}{m^3}$;

D - дефіцит кисню, який можна отримати як різницю між концентрацією розчиненого кисню при насиченні та фактичною концентрацією розчиненого кисню ($D = DO_{sat} - DO$). D має розмірність $\frac{g}{m^3}$;

k_1 - коефіцієнт розкладання органічної речовини (коефіцієнт дезоксигенації), зазвичай вимірюється в 1/добу (d^{-1});

k_2 - коефіцієнт реаерації, зазвичай вимірюється в 1/добу (d^{-1});

L_α - залишкове споживання кисню на момент часу t ;

D_α - дефіцит кисню в початковий момент часу t ;

t - пройдений час, зазвичай доба (d).

Зазвичай, коефіцієнт k_1 знаходиться в діапазоні від 0,05 до 0,5 d^{-1} , а k_2 в діапазоні від 0,4 до 1,5 d^{-1} .

Для практичної реалізації моделі розроблено алгоритм у середовищі Jupyter Notebook з використанням мови програмування Python. Алгоритм включає наступні етапи:

1. Зчитування та попередня обробка вхідних даних з файлів формату .xls[x], що містять інформацію про дату спостереження, температуру води, рівень біологічної активності та насиченість киснем.

2. Визначення коефіцієнта реаерації на основі температури води, швидкості потоку та глибини річки з використанням формул Овенса-Гіббса, О'Коннора-Доббінса.

3. Розрахунок коефіцієнта деградації шляхом експоненційної регресії даних біологічного споживання кисню.

4. Побудова прогностичних графіків динаміки БСК та розчиненого кисню.

Для реалізації алгоритму використано бібліотеки Python:

1) pandas (обробка структурованих даних);

2) numpy (математичні операції);

3) scipy (експоненційна регресія);

4) matplotlib (візуалізація результатів).

Валідація моделі здійснювалась шляхом порівняння модельних результатів з фактичними даними моніторингу за період 2020-2023 рр. Оцінка точності прогнозування проводилась на основі коефіцієнта детермінації (R^2) та середньоквадратичного відхилення для ключових гідрохімічних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Розроблена автоматизована система прогнозування гідроекологічного стану річкових систем базується на модифікованій моделі Стрітера-Фелпса та реалізована у вигляді програмного модуля з використанням Python у середовищі Jupyter Notebook. Алгоритм функціонування системи включає послідовні етапи обробки даних та моделювання. Початковий етап передбачає зчитування вхідних даних з файлів формату .xls[x], де кожен файл містить повний набір спостережень для конкретної річки. Структура вхідних даних включає дату спостереження, температуру води, рівень біологічної активності та насиченість киснем, які завантажуються у датафрейм для подальшої обробки.

Спостереження за річкою, після зчитування піддаються попередній обробці. Попередня обробка складається з двох дій: перетворення строкових значень дати відповідно шаблону, який було визначено при створенні моделі, до вигляду дійсного числа та сортування всіх записів за датою для забезпечення коректності обчислень згідно алгоритму моделі.

Після зчитування та обробки даних, модель об'єднує всю інформацію та організовує її для подальшої обробки в рамках моделі Стрітера-Фелпса. Це дозволяє провести комплексний аналіз водних ресурсів і оцінити їхній вплив на екологічні системи. При ініціалізації моделі задаються значення для визначення початку та кінця неперервного вікна, в якому обчислюються параметри моделі Стрітера-Фелпса. Це неперервне вікно дозволяє моделі ефективно обробляти дані, оцінювати динаміку змін та робити прогнози на основі зібраних даних.

Для початку обчислення за моделлю алгоритм спочатку визначає коефіцієнт реаерації. Цей коефіцієнт розраховується на основі температури води на початку обчислювального вікна, типової швидкості потоку та типової глибини для конкретної річки. Вибір методу обчислення залежить від значень глибини і швидкості потоку. Для цього можуть бути застосовані різні формули, такі як формула Овенса-Гіббса, О'Коннора-Доббінса або Черчелля, кожна з яких адаптована до специфічних умов річки.

Далі, для оцінки біологічної активності, алгоритм обчислює коефіцієнт деградації. Це здійснюється шляхом виконання експоненційної регресії на даних, що охоплюють раніше визначене обчислювальне вікно. Процес полягає в алгоритмічному зменшенні похибки оцінки цього невідомого коефіцієнта для формули біологічного споживання кисню. Для цього використовуються реальні значення біологічного споживання кисню, отримані з даних, зібраних протягом обраного вікна обчислення. Це дозволяє точно підставити реальні дані в модель і отримати точні оцінки необхідних параметрів. Після визначення коефіцієнта реаерації та коефіцієнта деградації біологічної активності алгоритм переходить до етапу побудови графіка, що відображає протікання процесів відповідно до моделі Стрітера-Фелпса.

На цьому етапі створюється графічне представлення, яке ілюструє динаміку змін в рівнях біологічного споживання кисню та їхні взаємозв'язки з іншими параметрами моделі, такими як реаерація та біологічна активність.

Графік будується на основі розрахованих коефіцієнтів та зібраних даних, що дозволяє візуально відобразити та проаналізувати, як ці параметри впливають на процеси в річковій системі. Цей візуалізаційний етап допомагає краще зрозуміти взаємодію між різними чинниками та оцінити ефективність моделі в реальних умовах, а також виявити можливі аномалії чи тенденції, що можуть вплинути на екологічний стан водного середовища.

Для кращої ілюстрації порядку та логіки обміну даними, а також для полегшення розуміння функціонування системи та взаємодії її окремих частин, представлена діаграма спілкування на рис. 4. Ця діаграма візуально демонструє, як компоненти системи обмінюються інформацією, а також показує послідовність та характер їх взаємодій. Використання діаграми спілкування допомагає зрозуміти процеси, що відбуваються в системі, і забезпечує наочне уявлення про те, як дані передаються і обробляються в межах моделі.

Спостереження за річкою, представлені у вхідній таблиці, після зчитування проходять етап попередньої обробки. Цей етап включає два основні кроки: перше — перетворення строкових значень дат у числовий формат відповідно до шаблону, визначеного під час створення моделі, що дозволяє представити дати як дійсні числа; друге — сортування всіх

записів за датою, щоб забезпечити коректність подальших обчислень відповідно до алгоритму моделі.

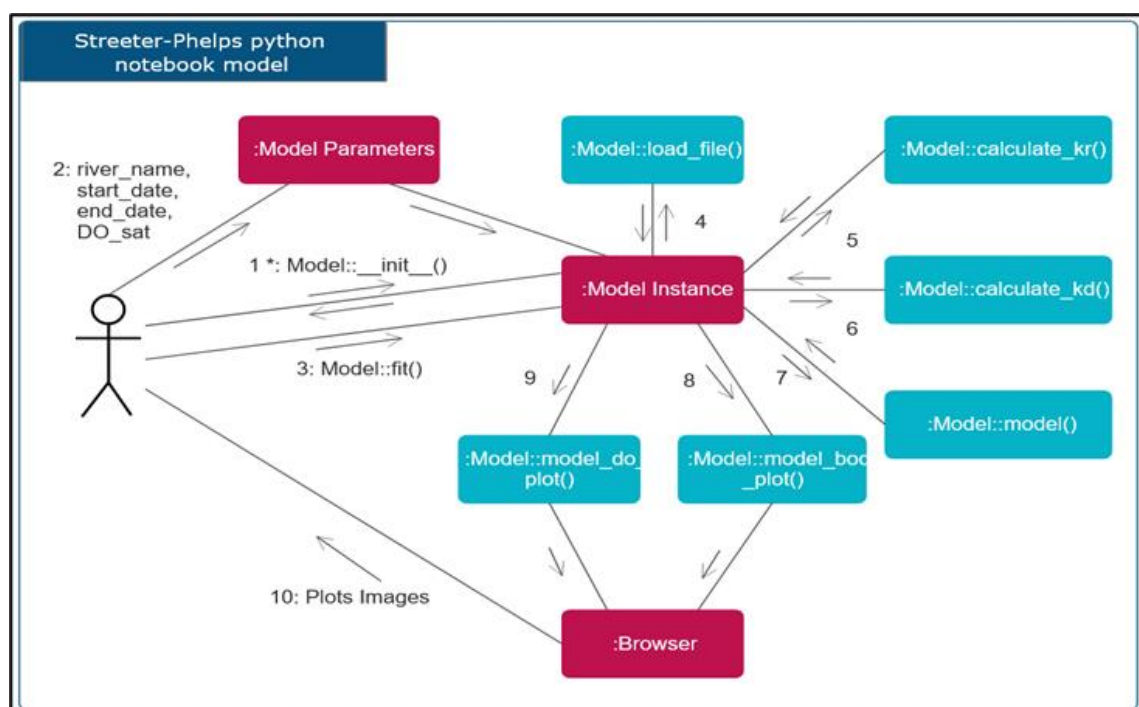


Рис. 4. Алгоритмічна схема взаємодії компонентів автоматизованої системи прогнозування гідроекологічного стану річок

Як середовище програмної реалізації моделі було обрано Jupyter Notebook із мовою програмування Python. Це рішення обрано через ряд важливих переваг, які забезпечують ефективну розробку і виконання моделі. По-перше, Jupyter Notebook не вимагає створення окремого файлу виконання, що спрощує процес налаштування і запуску моделі. По-друге, платформа забезпечує відкритий початковий код, що дозволяє гнучко налаштовувати алгоритм моделі без обмежень. По-третє, Jupyter Notebook є кросплатформним, що забезпечує його використання на різних операційних системах без додаткових налаштувань.

Окрім того, Jupyter Notebook пропонує зручний інтерфейс для інтерактивного виконання коду та перевірки результатів в реальному часі, що підвищує ефективність розробки. Гнучкість платформи дозволяє легко модифікувати алгоритм моделі та адаптувати його під специфічні вимоги без значних зусиль. Легкість конфігурації вхідних даних і можливість швидкого налаштування програмного рішення також є значними перевагами.

Для річки Тетерів прогностична модель відображає паттерн еволюції кисневого режиму з вираженою інтенсифікацією процесів аерації (рис. 5). За прогнозований період очікується приріст концентрації розчиненого кисню з 9.0 мг/л (2020 р.) до 11.0 мг/л (2045 рік), що становить 22.2%. Примітно, що відносна насиченість води киснем у річці Тетерів трансформується від субоптимальної (80-85%) до оптимальної (92-96%) при стандартних гідротермічних умовах. Морфологія кривої насичення має більш пологий характер у порівнянні з річкою Кам'янка, що пояснюється відмінностями у гідрологічному режимі та вищою часткою поверхневого стоку в річці Тетерів (52 мм·рік⁻¹ проти 22 мм·рік⁻¹ у річці Кам'янка), що впливає на кінетику газообміну на межі розділу фаз вода-повітря та режим реаерації.

Динаміка біохімічного споживання кисню річки Тетерів за результатами моделювання демонструє систематичне зниження з 4.4 мг O₂/л до 3.2 мг O₂/л (рис. 6). Коефіцієнт детермінації моделі для показника БСК₅ становить R²=0.89, що відображає високу кореляцію між модельними та фактичними значеннями. Від'ємний градієнт кривої БСК₅ є менш вираженим порівняно з річкою Кам'янка, що зумовлено складнішою структурою

водозбору річки Тетерів, наявністю множинних дифузних джерел забруднення та вираженою сезонною варіабельністю стоку. Модель враховує особливості лотичної екосистеми річки Тетерів, включаючи коефіцієнт реаерації (k_2), диференційований залежно від турбулентності потоку, морфометричних характеристик русла та температурних умов, та варіюється в діапазоні від 0.32 до 0.45 доба⁻¹.

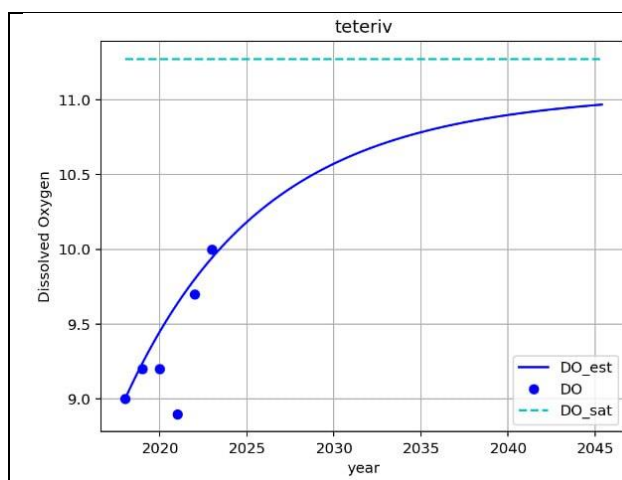


Рис. 5. Динаміка концентрації розчиненого кисню в р. Тетерів за період 2020-2045 рр.

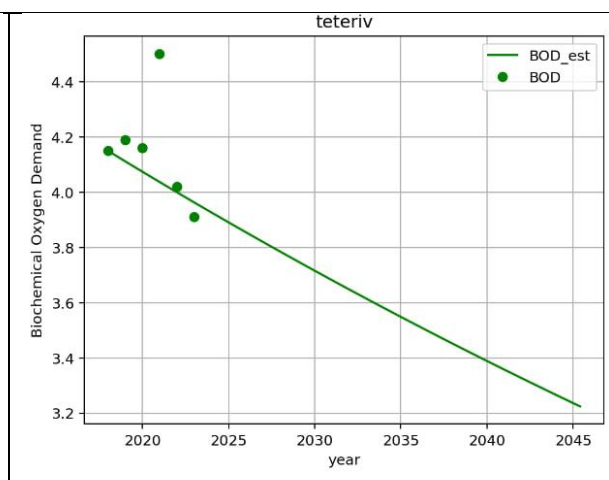


Рис. 6. Прогнозні значення біохімічного споживання кисню для р. Тетерів на період до 2045 р.

Верифікація інтегральної моделі на основі ретроспективних даних моніторингу за 2020-2023 рр. підтвердила достовірність прогнозування ключових гідрохімічних параметрів з високою точністю: середньоквадратичне відхилення для розчиненого кисню не перевищує ± 0.2 мг/л, для БСК5 - ± 0.15 мг O_2 /л. Отримані результати свідчать про потенційне покращення екологічного стану досліджуваних лотичних систем та поступову стабілізацію їх аеробного метаболізму в умовах урбанізованого ландшафту м. Житомир.

Висновки.

1. Проведено детальний аналіз наявних методів моделювання гідроекологічних процесів, що демонструє доцільність адаптації моделі Стрітера-Фелпса для урбанізованих малих річок, враховуючи специфіку їхньої гідроекологічної взаємодії з навколишнім середовищем, що дозволяє оптимізувати екологічні заходи в умовах високої антропогенної навантаженості.
2. Розроблений алгоритм інтегральної модифікації моделі Стрітера-Фелпса враховує гідрохімічні характеристики, притаманні урбанізованим малим річкам, забезпечуючи підвищену точність прогнозування кисневого режиму та динаміки органічного забруднення, що сприяє кращій адаптації моделі до реальних екологічних умов.
3. Створення програмного модуля для автоматизованого прогнозування гідроекологічного стану дозволяє здійснювати високоточну оцінку екологічної якості води в малих річках, використовуючи сучасні методи обробки великих даних та візуалізації результатів, що є важливим для оперативного екологічного моніторингу.
4. Проведена верифікація модифікованої моделі на основі натурних досліджень гідрохімічних параметрів річок Кам'янка та Тетерів в межах урбоекосистеми м. Житомир підтвердила високу точність прогнозування. Модель демонструє надійні результати для розчиненого кисню (DO) та біохімічного споживання кисню (БСК), що дозволяє отримувати достовірні прогнози для ключових екологічних показників. Це робить можливим її ефективне застосування в екологічному менеджменті, зокрема в рамках контролю і зниження антропогенного навантаження на водні об'єкти. Згідно з прогнозами, до 2045 року очікується покращення кисневого режиму річки. Для річки Тетерів прогноз свідчить про підвищення DO з 9,0 мг/л до 11,0 мг/л, а також про зниження БСК з 4,4 мг/л до 3,2 мг/л, що свідчить про покращення процесів самоочищення. Ці прогностичні результати підтверджують можливість поліпшення екологічного стану річок до 2045 року за умови збереження поточних тенденцій та обмеження додаткових антропогенних впливів, що є

важливим фактором для стратегії екологічної реабілітації малих річок урбанізованих територій.

5. Сформовані прогностичні сценарії засвідчили можливість покращення кисневого режиму та зменшення біохімічного споживання кисню, що свідчить про перспективи екологічної реабілітації річок при збереженні поточних тенденцій, що є основою для стратегічного екологічного планування.

6. Запропоновані методичні рекомендації щодо інтеграції автоматизованої системи прогнозування в екологічний менеджмент є важливими для розробки превентивних заходів, спрямованих на підтримку гідроекологічного стану водних об'єктів в умовах посиленої урбанізації.

Список літератури

1. Cox, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *Science of The Total Environment*, 2003, Vol. 314-316, pp. 335–377.
2. Fan C., Wang W.-S., Liu K. F., Yang T.-M. Sensitivity Analysis and Water Quality Modeling of a Tidal River Using a Modified Streeter–Phelps Equation with HEC-RAS-Calculated Hydraulic Characteristics. *Environmental Modeling & Assessment*. 2012. Vol. 17(6). P. 639-651.
3. Arifin A., Mohamed R., Al-Gheethi A., Kassim A., Yaakob M. A. Assessment of household greywater discharge from village houses using Streeter-Phelps model in stream. *Desalination and Water Treatment*. 2020. Vol. 177. P. 311-318.
4. Park, S. S., Lee, Y. S. A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling*, 2002, Vol. 152(1), pp. 65–75.
5. Rauch, W., Henze, M., Koncsos, L., Reichert, P. River water quality modelling: I. State of the art. *Water Science and Technology*, 1998, Vol. 38(11), pp. 237–244. Jian C. Study on the shortcoming of streeter-phelps model and its improvement. *Journal of Anhui University of Technology*. 2003. Vol. 20. P. 36-38.
6. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Demchuk L., Vovk V. Hydrochemical Determination of the Teteriv River and the Kamianka River Eutrophication Potential. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2023. No. 1. P. 1-5.
7. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Shomko O., Gandziura V., Khamdosh I. Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10(2). P. 135-144.
8. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, no. 3. P. 378-395.
9. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю. Антропогенні детермінанти деградації гідрохімічних показників водних об'єктів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 349, № 2. С. 540-548.
10. Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Кірейцева Г. В., Герасимчук О. Л., Скиба Г. В., Хоменко С. В. Особливості планування та реалізації моніторингу малих річок в умовах урбанізації та військових дій. *Науковий вісник ХДУ. Серія: Географічні науки*. 2024. № 21. С. 28-34.
11. Скиба Г. В., Кірейцева Г. В., Герасимчук О. Л., Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Хоменко С. В. Визначення та прогнозування вмісту есенціальних важких металів у поверхневих водах урбанізованих ділянок річки Тетерів (Житомир). *Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки*. 2024. Вип. 2. С. 50-57.
12. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Герасимчук О. Л., Скиба Г. В., Хоменко С. В. GAP-аналіз водокористування у контексті запобігання евтрофікації річки Тетерів в межах урбоєкосистеми м. Житомира. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 4(55). С. 53-58.
13. Rinaldi S., Soncini-Sessa R. Sensitivity analysis of generalized Streeter-Phelps models. *Advances in Water Resources*. 1978. Vol. 1. P. 141-146.
14. Rinaldi S., Soncini-Sessa R. Sensitivity Analysis of Streeter-Phelps Models. *International Journal of Control*. 1977. Vol. 25. P. 1-8.
15. Rinaldi S., Soncini-Sessa R., Romano P. Parameter Estimation of Streeter-Phelps Models. *Journal of the Environmental Engineering Division*. 1979. Vol. 105(1). P. 75-88.
16. Moura L. S., Lopes R. B., Ribeiro J., Fernandes G., Almeida R. M., Melo S. Mathematical modeling in the Urumari micro-watershed using Streeter-Phelps mathematical models and the enhanced Do-Bod model. *Brazilian Journal of Development*. 2020. Vol. 6(3). P. 13904-13914.
17. Meléndez Maza A. J., Rodríguez-Arías H. A., Pasqualino J. Validation of the Streeter-Phelps Model in Matlab to predict biochemical demand for oxygen DOB and dissolved oxygen OD. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2020. Vol. 16(1). P. 38-47.

18. Long B. T. Inverse algorithm for Streeter-Phelps equation in water pollution control problem. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2020. Vol. 171. P. 119-126.

References

1. Cox, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *Science of The Total Environment*, 2003, Vol. 314-316, pp. 335–377
2. Fan C., Wang W.-S., Liu K. F., Yang T.-M. Sensitivity Analysis and Water Quality Modeling of a Tidal River Using a Modified Streeter–Phelps Equation with HEC-RAS-Calculated Hydraulic Characteristics. *Environmental Modeling & Assessment*. 2012. Vol. 17(6). P. 639-651.
3. Arifin A., Mohamed R., Al-Gheethi A., Kassim A., Yaakob M. A. Assessment of household greywater discharge from village houses using Streeter-Phelps model in stream. *Desalination and Water Treatment*. 2020. Vol. 177. P. 311-318.
4. Park, S. S., Lee, Y. S. A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling*, 2002, Vol. 152(1), pp. 65–75.
5. Rauch, W., Henze, M., Koncsos, L., Reichert, P. River water quality modelling: I. State of the art. *Water Science and Technology*, 1998, Vol. 38(11), pp. 237–244. Jian C. Study on the shortcoming of streeter-phelps model and its improvement. *Journal of Anhui University of Technology*. 2003. Vol. 20. P. 36-38.
6. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Demchuk L., Vovk V. Hydrochemical Determination of the Teteriv River and the Kamianka River Eutrophication Potential. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2023. No. 1. P. 1-5.
7. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Shomko O., Gandziura V., Khamdosh I. Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10(2). P. 135-144.
8. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, no. 3. P. 378-395.
9. Kireitseva H. V., Tsyhanenko-Dziubenko I. Yu. Antropogenni determinanty degradatsii gidrokhimichnykh pokaznykiv vodnykh ob'ektiv [Anthropogenic determinants of water bodies hydrochemical indicators degradation]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*. 2025. T. 349, № 2. S. 540-548.
10. Tsyhanenko-Dziubenko I. Yu., Kireitseva H. V., Herasymchuk O. L., Skyba H. V., Khomenko S. V. Osoblyvosti planuvannya ta realizatsii monitorynhu malykh richok v umovakh urbanizatsii ta viiskovykh dii [Features of planning and implementation of small rivers monitoring in conditions of urbanization and military actions]. *Naukovyi visnyk KhDU. Seriya: Heohrafichni nauky*. 2024. № 21. S. 28-34.
11. Skyba H. V., Kireitseva H. V., Herasymchuk O. L., Tsyhanenko-Dziubenko I. Yu., Khomenko S. V. Vyznachennia ta prognozuvannia vmistu esentsialnykh vazhkykh metaliv u poverkhnevyykh vodakh urbanizovanykh dilianok richky Teteriv (Zhytomyr) [Determination and forecasting of essential heavy metals content in surface waters of urbanized sections of the Teteriv River (Zhytomyr)]. *Slobozhanskyi naukovyi visnyk. Seriya: Pryrodnychi nauky*. 2024. Vyp. 2. S. 50-57.
12. Kireitseva H. V., Tsyhanenko-Dziubenko I. Yu., Herasymchuk O. L., Skyba H. V., Khomenko S. V. GAP-analiz vodokorystuvannia u konteksti zapobigannia evτροφikatsii richky Teteriv v mezhakh urboekosystemy m. Zhytomyra [GAP-analysis of water use in the context of preventing eutrophication of the Teteriv River within the urban ecosystem of Zhytomyr city]. *Ekolohichni nauky*. 2024. Vyp. 4(55). S. 53-58.
13. Rinaldi S., Soncini-Sessa R. Sensitivity analysis of generalized Streeter-Phelps models. *Advances in Water Resources*. 1978. Vol. 1. P. 141-146.
14. Rinaldi S., Soncini-Sessa R. Sensitivity Analysis of Streeter-Phelps Models. *International Journal of Control*. 1977. Vol. 25. P. 1-8.
15. Rinaldi S., Soncini-Sessa R., Romano P. Parameter Estimation of Streeter-Phelps Models. *Journal of the Environmental Engineering Division*. 1979. Vol. 105(1). P. 75-88.
16. Moura L. S., Lopes R. B., Ribeiro J., Fernandes G., Almeida R. M., Melo S. Mathematical modeling in the Urumari micro-watershed using Streeter-Phelps mathematical models and the enhanced Do-Bod model. *Brazilian Journal of Development*. 2020. Vol. 6(3). P. 13904-13914.
17. Meléndez Maza A. J., Rodríguez-Arias H. A., Pasqualino J. Validation of the Streeter-Phelps Model in Matlab to predict biochemical demand for oxygen DOB and dissolved oxygen OD. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2020. Vol. 16(1). P. 38-47.
18. Long B. T. Inverse algorithm for Streeter-Phelps equation in water pollution control problem. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2020. Vol. 171. P. 119-126.

Forecasting the hydroecological status of the Teteriv River using a modified Streeter-Phelps model

Tsyhanenko-Dziubenko I.Yu., Kireitseva H.V., Skyba H.V.

An automated system for forecasting the hydroecological status of the Teteriv River has been developed and verified based on integral modification of the Streeter-Phelps model, accounting for the specificity of urbanized river systems. The study was conducted on a 12.5 km section of the Teteriv River within Zhytomyr city using retrospective hydrochemical monitoring data from 2019-2023. The software module, implemented in Jupyter Notebook environment using Python, provides automated input data processing, calculation of reaeration and organic matter degradation coefficients, and construction of predictive models for biochemical oxygen demand and dissolved oxygen concentration dynamics. The modified model incorporates enhanced algorithms for coefficient determination, including Owens-Gibbs and O'Connor-Dobbins formulations for reaeration coefficient calculation, with exponential regression analysis for degradation parameter estimation. Advanced data preprocessing protocols ensure temporal consistency and spatial correlation analysis across monitoring stations. The system integrates hydrological characteristics from SWAT modeling platform, accounting for surface runoff patterns, groundwater contributions, and water balance components specific to urbanized watersheds. Model verification confirmed high forecasting accuracy with determination coefficient $R^2=0.89$ for BOD_5 and root mean square deviation ± 0.2 mg/l for dissolved oxygen. Sensitivity analysis demonstrated robust performance across varying flow conditions and seasonal temperature fluctuations. Cross-validation using independent datasets confirmed model stability with minimal overfitting. Prognostic scenarios until 2045 demonstrate potential improvement in river ecological status: dissolved oxygen concentration increase from 9.0 to 11.0 mg/l and BOD_5 reduction from 4.4 to 3.2 mg O_2 /l, indicating intensification of self-purification processes and ecological rehabilitation of the aquatic ecosystem under urbanized landscape conditions. The automated system provides decision-support capabilities for environmental management, enabling real-time assessment and preventive intervention strategies for urban river restoration programs.

Keywords: pollution, hydroecological forecasting, automated system, Teteriv River, urbanization, water bodies.

Надійшла до редколегії 13.04.2025