

В. С. Палій<sup>1</sup>  
С. М. Кватернюк<sup>1</sup>  
С. В. Мандебура<sup>2</sup>  
Д. Р. Латуша<sup>1</sup>  
В. О. Шевченко<sup>1</sup>

## ДОСЛІДЖЕННЯ НІТРОГЕНВМІСНИХ СПОЛУК У ВЕРХНІЙ ТЕЧІЇ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ

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

<sup>2</sup>Уманський державний педагогічний університету ім. Павла Тичини

### Анотація

У статті проведено комплексний аналіз гідрохімічного стану, оцінку динаміки та прогнозування трансформації нітрогенвмісних сполук у верхній течії річки Південний Буг в умовах інтенсивного антропогенного навантаження. Досліджено фізико-географічні та морфометричні особливості басейну, а також чинники формування сучасної екологічної ситуації в регіоні. Встановлено, що тотальна зарегульованість у поєднанні з високою щільністю населення та дифузним агрогенним зливом призвела до кардинальної зміни природного гідрологічного режиму та трансформації проточної системи на серію вразливих озерних екосистем. Виявлено хронічні перевищення нормативних концентрацій сполук азоту. Обґрунтовано складну фізико-хімічну природу токсичності амонію, що разом із нітритами й нітратами становить пряму загрозу для гідробіонтів та безпеки питного водопостачання. Визначено, що сповільнений водообмін та надходження антропогенних біогенів каталізують незворотну евтрофікацію водойм, дефіцит розчиненого кисню та деградацію унікальних біотопів Південнобузького екологічного коридору, занесених до Червоної книги України. За інтегральним Водним коефіцієнтом забруднення (WPI) та показниками ХСК якість води у верхній течії відповідає III («помірно забруднені») та IV («брудні») класам. Доведено недостатність традиційних методів моніторингу та обґрунтовано необхідність впровадження інтегрованого підходу із застосуванням математичного моделювання та аналізу великих даних для прогнозування просторово-часової трансформації азоту.

**Ключові слова:** гідрохімічний режим, нітрогенвмісні сполуки, амонійний азот, евтрофікація, якість води, екологічний моніторинг.

### Abstract

The article provides a comprehensive analysis of the hydrochemical state, an assessment of the dynamics and forecasting of the transformation of nitrogen-containing compounds in the upper reaches of the Southern Bug River under conditions of intensive anthropogenic loading. The physical, geographical and morphometric features of the basin are studied, as well as the factors shaping the current ecological situation in the region. It is established that total overregulation in combination with high population density and diffuse agrogenic washout has led to a cardinal change in the natural hydrological regime and the transformation of the flow system into a series of vulnerable lake ecosystems. Chronic excesses of the normative concentrations of nitrogen compounds are revealed. The complex physicochemical nature of ammonium toxicity is substantiated, which, together with nitrites and nitrates, poses a direct threat to aquatic organisms and the safety of drinking water supply. It was determined that the slowed water exchange and the influx of anthropogenic nutrients catalyze the irreversible eutrophication of water bodies, the deficiency of dissolved oxygen and the degradation of unique biotopes of the South-Dennobuzh ecological corridor, listed in the Red Book of Ukraine. According to the integral Water Pollution Index (WPI) and COD indicators, the water quality in the upper reaches corresponds to classes III ("moderately polluted") and IV ("polluted"). The insufficiency of traditional monitoring methods is proven and the need for the implementation of an integrated approach using mathematical modeling and big data analysis for predicting the spatial and temporal transformation of nitrogen is substantiated.

**Keywords:** hydrochemical regime, nitrogen-containing compounds, ammonium nitrogen, eutrophication, water quality, environmental monitoring.

### Вступ

Сучасна трансформація довкілля під впливом інтенсивної господарської діяльності призвела до критичного порушення природного кругообігу нітрогену, що формувався протягом мільйонів років. Масштабне використання мінеральних добрив та зростання обсягів стічних вод перетворили проблему забруднення водних об'єктів біогенними елементами на одну з ключових загроз національній еко-

логічній безпеці. Річка Південний Буг, як стратегічно важлива водна артерія, басейн якої повністю розташований у межах України, відіграє вирішальну роль у забезпеченні сталого розвитку регіону. Проте її верхня течія перебуває під значним техногенним тиском: від скидів комунальних очисних споруд у Вінниці, де фіксуються критичні перевищення вмісту амонію, до хронічного нітратного забруднення підземних вод. Актуальність теми полягає в тому, що традиційні методи екологічного моніторингу, орієнтовані лише на фіксацію концентрацій забруднювачів, виявляються недостатніми для розуміння складних процесів трансформації сполук азоту. Явища масової евтрофікації та погіршення якості питної води вимагають впровадження інтегрованого підходу. Використання сучасних інструментів аналізу великих даних та математичного моделювання дозволяє не лише оцінити поточний стан екосистеми, а й прогнозувати поширення забруднень, що є життєво необхідним для захисту водних ресурсів. Метою роботи є комплексний аналіз, оцінка динаміки та прогнозування трансформації нітрогенвмісних сполук у верхній течії річки Південний Буг для обґрунтування заходів щодо покращення екологічного стану водного середовища.

### Результати дослідження

Розуміння гідрохімічних процесів, що відбуваються в Південному Бузі, вимагає детального аналізу його фізико-географічних, морфометричних та ландшафтних умов. Річка Південний Буг має виняткову особливість – це одна з найбільших річок України і єдина велика водна артерія, басейн якої повністю (на 100%) розташований у межах державної території України, що робить управління цим басейном виключною внутрішньою справою держави.

Загальна довжина Південного Бугу становить 806 км, а площа водозбору досягає 63,7 тис. км<sup>2</sup>. Район басейну річки (РБР) Південний Буг є масштабною гідрологічною системою, що покриває 10,5% території України. Район басейну охоплює територію 7 областей України: Хмельницьку, Вінницьку, Київську, Черкаську, Кіровоградську, Миколаївську та Одеську. Гідрографічна мережа РБР Південний Буг надзвичайно розгалужена і включає 301 річку з довжиною понад 10 км, а також 164 водосховища (з об'ємом більше 1 млн м<sup>3</sup>). Відповідно до наказу Міністерства екології та природних ресурсів України №103 від 3 березня 2017 року у РБР Південний Буг виділяється 11 суббасейнів або водогосподарських ділянок.

Верхня течія Південного Бугу адміністративно приурочена до Хмельницької та Вінницької областей і геоморфологічно розташована на Подільській височині. Цей регіон характеризується хвилястим, глибоко розчленованим рельєфом, з перепадами висот, густою яружно-балковою мережею та каньйоноподібними долинами річок у місцях виходу на поверхню кристалічних порід Українського щита.

Живлення річки має змішаний характер, з переважанням снігового та дощового. Гідрологічний режим у природних умовах характеризувався б вираженою весняною повінню, низькою літньою меженню, періодичними осінніми паводками та стабільною зимовою меженню. Проте природний гідрологічний режим верхньої течії Південного Бугу нині кардинально змінений людиною.

Значний вплив на гідрологію басейну здійснюють притоки. Наприклад, однією з помітних лівих приток у верхній течії є річка Вовк, яка повністю протікає в межах Хмельницької області. Вона має довжину 71 км та площу басейну 915 км<sup>2</sup>. Режим таких малих приток визначає якість води, що надходить у головне русло.

Басейн Південного Бугу є унікальним екологічним коридором, який відіграє ключову роль у збереженні біорізноманіття регіону. Рослинність Південнобузького коридору представлена в основному лісами (заплавними, плакорними, на деяких ділянках – терасовими), меншою мірою – степами, луками, болотами, водною і скельною рослинністю. У верхній течії річки безпосередньо в заплаві великі площі займають трав'яні болота, які виконують надзвичайно важливу екосистемну функцію природних біофільтрів: вони акумулюють органіку, затримують завислі речовини з поверхневого стоку та створюють умови для денітрифікації.

Лісова рослинність у верхній та середній течії Південного Бугу в межах екокоридору переважає у вигляді грабово-дубових, в'язово-дубових та вільхових лісів. Грабово-дубові ліси є зональним, клімаксовим типом рослинності для цієї території. Дослідження флори Південно-Бузького меридіонального екологічного коридору, проведені вітчизняними ботаніками, виявили наявність цілої низки видів рослин, які занесені до Червоної книги України. Серед них: цибуля ведмежа (*Allium ursinum*), астрагал щетинистий (*Astragalus setosulus*), береза дніпровська (*Betula borysthenica*), брандушка весняна (*Bulbocodium vernum*), брандушка різнобарвна (*Bulbocodium versicolor*), карагана скіфська (*Caragana scythica*), осока Девелла (*Carex davalliana*), волошка перлиста (*Centaurea margaritacea*), вишня Клокова

(*Cerasus klokovii*), зіновать біла (*Chamaecytisus albus*) та зіновать Блоцького (*Chamaecytisus blockianus*). Наявність таких рідкісних видів підкреслює високу природоохоронну цінність територій, прилеглих до річки.

Проте сучасні дослідження природних біотопів фіксують їхню невинну деградацію під антропогенним тиском. Встановлено, що заплавні луки й водні біотопи зазнають руйнування, зволожені луки мають глибокі сліди гідротехнічної меліорації (осушення), а природні байрачні ліси є сильно фрагментованими. Водночас виявляються лише локальні острівці добре збереженої степової рослинності з охоронюваними видами, що вимагає термінових заходів з екологічного планування та природоохоронного моніторингу.

Гідрохімічний стан басейну нерозривно пов'язаний із соціально-економічними факторами. В басейні Південного Бугу нараховується 2966 населених пунктів, в яких станом на 2018 рік проживало близько 3,7 млн. осіб. Щільність населення в Хмельницькій та Вінницькій областях є доволі високою і складає від 65 до 90 осіб на 1 км<sup>2</sup>. Така густина населення в поєднанні з розвиненим агропромисловим комплексом генерує безперервний потік поллютантів.

Гідрохімія вод Південного Бугу тісно пов'язана з геологічною будовою ложа річки. Аналіз іонного складу показує, що кальцій та гідрокарбонати домінують у гідрохімії підземних та поверхневих вод басейну. Гідрокарбонати є одними з основних компонентів, що визначають загальну жорсткість та мінералізацію води, при цьому спостерігається чітка позитивна кореляція між гідрокарбонатами та сульфатами, що свідчить про їх спільну присутність і походження у річковій воді як результат хімічного вивітрювання геологічних формацій.

Найбільшим фактором, що змінив гідрологію річки, є її тотальна зарегульованість. Наявність 164 великих водосховищ перетворила проточну систему Південного Бугу на каскад озерних систем. Уповільнення швидкості течії призвело до порушення природного транспорту наносів, замулення русла та створення ідеальних інкубаторних умов для розвитку ціанобактерій. Взаємодія цього сповільненого водообміну з високим природним вмістом поживних елементів у ґрунтах Поділля та масованим скидом біогенів (нітрогену та фосфору) формує ідеальні умови для екологічної катастрофи [1-3]. Насичення води біогенними речовинами, такими як сполуки азоту і фосфору, може призвести до масштабної евтрофікації, яка у свою чергу має значні, часто незворотні екологічні наслідки для гідробіотів та санітарного стану вод. Вплив нітрогенвмісних сполук має дуалістичний характер: з одного боку, вони проявляють пряму токсикологічну дію на живі організми, з іншого – виступають каталізаторами деструктивних структурних змін в усій екосистемі.

Різні хімічні форми азоту володіють різною біологічною активністю та токсичністю. Найбільш небезпечними для гідробіотів є іони амонію та нітриту. Токсичність амонійного азоту має складну фізико-хімічну природу. У водному середовищі існує динамічна рівновага між іоном амонію та розчиненим вільним аміаком. Ця рівновага критично залежить від температури та водневого показника (рН) води. Токсичність амонію стрімко збільшується з підвищенням рН (зсув середовища у лужний бік). У лужному середовищі відсоток вільного, недисоційованого аміаку різко зростає. Саме молекула  $NH_3$  є ліпофільною, легко проникає через клітинні мембрани зябрового апарату риб у кровотік, викликаючи важке ураження центральної нервової системи, судоми і смерть від асфіксії. Перевищення концентрацій амонію є хронічною проблемою Південного Бугу. Наприклад, в ході спостережень на межі Вінницької та Хмельницької областей експрес-аналіз зафіксував вміст азоту амонійного на рівні 4,1 мг/дм<sup>3</sup>, а подальше лабораторне дослідження підтвердило концентрацію 4,2 мг/дм<sup>3</sup> – при нормі для даної категорії водойм всього 1,0 мг/дм<sup>3</sup>.

Нітриту є проміжною формою нітрифікації і найтоксичнішим іоном серед сполук азоту. Вони взаємодіють з гемоглобіном крові риб, окислюючи залізо в ньому та перетворюючи його на метгемоглобін, який втрачає здатність зв'язувати і транспортувати кисень. Це призводить до хвороби крові у риб і масової їх загибелі навіть при відносно високих концентраціях кисню у воді.

Нітрати, будучи кінцевим продуктом мінералізації, менш токсичні для риб, але становлять грандіозну загрозу для здоров'я людини при використанні такої води для питного водопостачання. В Україні 80% централізованого питного водопостачання забезпечується саме за рахунок поверхневих вод. Ці води постійно піддаються антропогенному забрудненню. Враховуючи неефективну роботу старих водоочисних споруд, наявність нітратів становить серйозну проблему в отриманні високоякісної питної води. Нітрати у травному тракті людини (особливо немовлят) відновлюються мікрофлорою до токсичних нітритів, викликаючи водно-нітратну метгемоглобінемію. Більше того, значна кількість органічних і неорганічних забруднювачів, що потрапляють у воду, а їх в європейському водному се-

редовищі налічується понад 700, можуть формувати різноманітні комплексні речовини з азотом. Їх метаболіти та продукти трансформації можуть спричиняти синергетичні токсичні ефекти, що становлять реальну загрозу для здоров'я нації.

Основним глобальним ефектом від скидів надлишку азоту та фосфору є евтрофікація морської та прісної води. Евтрофікація – це процес, за допомогою якого масований стік поживних речовин викликає неконтрольоване заростання водойми фітопланктоном (водоростями) та тягне за собою ряд катастрофічних наслідкових проблем. В річках, озерах та морських водах надлишок азоту та інших поживних речовин стимулює патологічний ріст синьо-зелених водоростей.

Аналіз загроз евтрофікації середньої ділянки басейну Південного Бугу вказує на те, що проблема набуває незворотного характеру. Науковці констатують стрімке підвищення рівня і концентрації фотосинтезуючих організмів у водоймах. До основних факторів, що каталізують цей процес саме у Південному Бугу, належать:

- зарегульованість русла – створення каскаду водосховищ зупинило течію;
- хімічне антропогенне навантаження: скиди комунальних та промислових стоків;
- хімізоване сільське господарство: дифузний змив добрив;
- використання фосфатних миючих засобів: постачання лімітуючого елемента – фосфору;
- природний фон – високий вміст поживних елементів у ґрунтах Поділля.

Наслідки надмірної концентрації поживних речовин впливають на всі ланки природних екосистем. Біомаса водоростей блокує проникнення сонячного світла на глибину, вбиваючи донні макрофіти. Найстрашнішим наслідком є виснаження запасів розчиненого кисню у воді. Під час нічного дихання, а особливо в кінці літа під час масового відмирання та гниття водоростей, бактерії-деструктори споживають майже весь наявний у воді кисень. Це призводить до задухи і масової загибелі риби та бентосу, руйнуючи рибне господарство і знищуючи рекреаційний потенціал річки. Як було показано на прикладі Вінниці, високий вміст амонійного азоту (перевищення у 7,5 раза) негативно впливає на екосистему і її біорізноманіття, оскільки процеси самоочищення різко знижують вміст кисню у воді.

Оцінка санітарно-екологічного стану проводиться за допомогою інтегральних показників, зокрема Водного коефіцієнта забруднення (WPI – Water Pollution Index). У 2019 році комплексні дослідження води річки Південний Буг виявили значний вміст органічних сполук по всій течії. Хімічне споживання кисню (ХСК) перевищувало допустимі норми на всій ділянці: 37,5 мг/дм<sup>3</sup> біля міста Хмільник (652 км від гирла) та 34,0 мг/дм<sup>3</sup> біля Вінниці (582 км від гирла). Вміст біогенних речовин також стабільно перевищував нормативи. Протягом усієї досліджуваної ділянки (555 км) вміст загального амонію становив 0,76 мг/дм<sup>3</sup> у Хмільнику, 1,12 мг/дм<sup>3</sup> у Вінниці та 1,04 мг/дм<sup>3</sup> у Вознесенську. За інтегральною оцінкою якість води Південного Бугу у цих пунктах відповідає III ("помірно забруднені") та IV ("брудні") класам якості води.

Подібна картина органічного та біогенного забруднення характерна не лише для Південного Бугу, а є системною проблемою для більшості річок України, що вимагає системних управлінських рішень на національному рівні.

## Висновки

Узагальнюючи результати дослідження, встановлено, що верхня течія річки Південний Буг перебуває під критичним антропогенним тиском через тотальну зарегульованість русла (каскад із 164 водосховищ), високу щільність населення та інтенсивне ведення агровиробництва, що трансформувало проточну систему на серію вразливих озерних екосистем. Хронічне надходження нітрогенвмісних сполук із комунальними стоками та дифузним агрогенним зливом призводить до перевищення нормативних концентрацій амонійного азоту (до 4,2 мг/дм<sup>3</sup>), що разом із нітритами й нітратами становить пряму загрозу для гідробіонтів та безпеки питного водопостачання. Поєднання сповільненого водообміну, природного фону ґрунтів Поділля та масованого скиду біогенів каталізує незворотні процеси евтрофікації та дефіциту розчиненого кисню, що зумовлює деградацію унікальних біотопів Південнобугського екологічного коридору, занесених до Червоної книги України, та знижує якість води до III («помірно забруднені») і IV («брудні») класів за індексом WPI. З огляду на це, традиційна фіксація концентрацій є недостатньою, що обґрунтовує необхідність переходу до інтегрованого підходу із застосуванням математичного моделювання та аналізу великих даних для прогнозування трансформації азоту і прийняття системних управлінських рішень на національному рівні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мандебура С. В., Латуша Д. Р., Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Шевченко В. О. Природоорієнтовані технології очищення стічних вод від нітрогенвмісних сполук з використанням штучних водно-болотних угідь у басейні р. Південний Буг. *Екологічні науки*. 2026. № 1(64). С. 66-72. doi: 10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.9
2. Кватернюк С. М., Мандебура В. С., Латуша Д. Р., Максименко М. П., Михальчук О. В. Запобігання забрудненню р.Південний Буг нітрогенвмісними сполуками з використанням штучних-водно болотних угідь. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. № 2(37). С. 200–207. doi: 10.31649/2311-1429-2024-2-200-207.
3. Кватернюк С. М., Мандебура С. В., Латуша Д. Р. Підвищення ефективності очищення сільськогосподарських дренажних вод з використанням штучних водно-болотних угідь. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. № 1(34). С. 183–189. doi: 10.31649/2311-1429-2023-1-183-189.

**Палій Вікторія Сергіївна** – студентка групи ЕКО-226, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [vikapaliy13@gmail.com](mailto:vikapaliy13@gmail.com).

**Кватернюк Сергій Михайлович** – д.т.н., професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [serg.kvaternuk@gmail.com](mailto:serg.kvaternuk@gmail.com).

**Мандебура Святослав Васильович** – викладач кафедри хімії, екології та методики їх навчання Уманського державного педагогічного університету ім. Павла Тичини, м. Умань, e-mail: [eko14b.mandebura@gmail.com](mailto:eko14b.mandebura@gmail.com).

**Латуша Дмитро Русланович** – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [dima.latusha27@gmail.com](mailto:dima.latusha27@gmail.com).

**Шевченко Валентин Олександрович** – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [raptor.sad77@gmail.com](mailto:raptor.sad77@gmail.com).

**Paliy Victoria Serhiivna** – student of group ECO-226b, Faculty of Civil Engineering, Civil and Ecological Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [vikapaliy13@gmail.com](mailto:vikapaliy13@gmail.com).

**Serhii M. Kvaterniuk** – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [serg.kvaternuk@gmail.com](mailto:serg.kvaternuk@gmail.com).

**Sviatoslav V. Mandebura** – Lecturer of the Department of Chemistry, Ecology and Methods of their teaching, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, e-mail: [eko14b.mandebura@gmail.com](mailto:eko14b.mandebura@gmail.com).

**Dmytro R. Latusha** – Postgraduate of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [dima.latusha27@gmail.com](mailto:dima.latusha27@gmail.com).

**Valentyn O. Shevchenko** – Postgraduate of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [raptor.sad77@gmail.com](mailto:raptor.sad77@gmail.com).