

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.6>

УДК 556.502/504

Бончковський А.С., Осипов В.В.

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, м. Київ, Україна

ОЦІНКА НАВАНТАЖЕННЯ БІОГЕННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ БАСЕЙНУ Р. СУЛА ВІД ТОЧКОВИХ ТА ДИФУЗНИХ ДЖЕРЕЛ

Надмірне надходження біогенних елементів (фосфору та нітрогену) у водойми викликає їх евтрофікацію та ряд інших несприятливих процесів. У Сулинській затоці, куди впадає Сула, вже тривалий час фіксуються надзвичайно інтенсивні процеси евтрофікації та загибель іхтіофауни, обумовлені великим навантаженням біогенних речовин на басейн Сули. Проте, домінуючий в Україні підхід до оцінки лише точкових джерел забруднення не дозволяв оцінити реальний обсяг біогенних речовин, які потрапляють у водойми. У статті використано розрахунковий метод оцінки навантаження басейну Сули біогенними елементами, який врахував надходження від точкових та дифузних джерел забруднення. Це дозволило встановити, що емісія у басейні Сули складає 921 т/рік або 0,05 т/км² для нітрогену та 313 т/рік або 0,017 т/км² для фосфору. Через природні процеси (передусім біоспоживання, нітрифікацію-денітрифікацію та седиментацію) значна частина біогенних речовин затримується у басейні. Безпосередньо до Сули потрапляє 273 т/рік нітрогену та 135 т/рік фосфору. Визначено, що головними джерелами біогенних речовин є надходження з орних земель, точкових джерел та від сільського населення не підключеного до каналізаційних мереж.

Ключові слова: антропогенне навантаження, емісія, точкові джерела, дифузні джерела, біогенні елементи, нітроген, фосфор, басейн р. Сула.

Вступ. Біогенні елементи є невід'ємною складовою забезпечення життєдіяльності рослинних і тваринних організмів. Серед них у водних екосистемах найважливішу роль відіграють сполуки нітрогену (N) і фосфору (P). Діяльність людини значною мірою порушила природну рівновагу вказаних елементів, наслідком чого стало значне збільшення їхніх концентрацій у поверхневих водних об'єктах. У Планах управління усіх без винятку річкових басейнів України забруднення біогенними елементами належать до головних водно-екологічних проблем [42].

Підвищений вміст сполук N і P є одним з основних чинників погіршення екологічного стану поверхневих вод та призводить до евтрофікації водойм. Біологічною відповіддю на зростання вмісту біогенних елементів є різке збільшення продуктивності рослинних організмів та виникнення явища «цвітіння». У свою чергу це обумовлює зниження прозорості води та концентрації кисню аж до утворення гіпоксії у придонних шарах, подальше погіршення якості води, втрату біорізноманіття, загибель іхтіофауни та вплив на здоров'я населення [25].

Біогенні елементи надходять до водних об'єктів від точкових і дифузних джерел. У практиці управління водними ресурсами України переважно зосереджувалися на точкових джерелах забруднення, як-от централізоване водовідведення стічних комунальних і промислових вод. Зокрема, як зазначено у роботі [39], урбанізовані території найбільше впливають на вміст біогенних елементів у річках.

Визначення ролі дифузних джерел тривалий час залишалося поза увагою дослідників, що пов'язано зі значною нерівномірністю їхнього прояву у межах річкового басейну, складністю врахування багатьох процесів, недостатнім розвитком в Україні сучасних технологій. Важливо підкреслити, що вплив дифузних джерел пов'язаний не лише з антропогенним чинником, певний внесок обумовлений дією природно-кліматичних умов басейну [38].

Для ефективного управління річковими басейнами необхідно впроваджувати методи комплексного аналізу забруднення поверхневих вод біогенними елементами та проводити

детальний аналіз формування загального обсягу надходження біогенних елементів та основних шляхів їхнього переносу. Це дозволить кількісно оцінити потоки нітрогену і фосфору та визначити основні чинники, що їх зумовлюють.

Аналіз виконаних раніше досліджень. Проблема оцінки навантаження поверхневих водних об'єктів біогенними елементами від точкових і дифузних джерел активно висвітлювалась у роботах дослідників європейських країн та США [3, 5, 11, 13, 24]. З прийняттям Водної Рамкової Директиви ЄС (ВРД) оцінка антропогенного навантаження стала обов'язковим компонентом підготовки Планів управління річковими басейнами. Після підписання Україною Угоди про асоціацію з ЄС необхідність оцінки навантаження біогенними елементами, зумовленого дією різноманітних джерел, також стало обов'язковим завданням політики управління водними ресурсами.

В Україні до цього часу проводився облік надходження біогенних елементів у складі стічних вод комунальних та промислових підприємств, а також визначалося транспортування біогенних елементів через замикальний створ річкового басейну. Оцінки висвітлювалися у вигляді абсолютних та відносних величин, виражених в $t \cdot \text{рік}^{-1}$ та $t \cdot \text{рік}^{-1} \text{км}^{-2}$, відповідно.

Однією з перших публікацій, присвячених дифузним джерелам забруднення аграрного походження в Україні, слід вважати роботу В.К. Хільчевського [47]. Згодом в Україні було опубліковано чимало праць, присвячених забрудненню водних басейнів біогенними речовинами, але вони як правило не деталізували джерела забруднення [34, 35, 41].

Значний прогрес у вивченні впливу дифузних джерел був досягнутий завдяки імплементації Водної Рамкової Директиви (ВРД) та участі українських науковців у ряді міжнародних проєктів. Зокрема, в межах ініціативи Координатора проєктів ОБСЄ в Україні були проведені розрахунки стоку біогенних елементів для басейнів річок Сіверський Донець та Дністер [37], а в межах Європейської спільної Водної ініціативи – для басейну річки Дніпро [45]. Згодом проблематика впливу дифузних джерел забруднення набувала все більшої уваги та висвітлювалась у наукових публікаціях [36, 38, 46].

Для визначення навантаження вод біогенними елементами більшою мірою використовуються модельні підходи. Прикладів їхнього застосування для України до цього часу небагато. Передусім слід зазначити транскордонний басейн Дунаю, до складу якого входять суббасейни Тиси, Пруту, Сирету та нижнього Дунаю, розташовані на території України. Оцінка навантаження біогенними елементами в ході підготовки Планів управління річковим басейном Дунаю виконувалась за допомогою концептуальної моделі MONERIS [14]. Для басейну Дунаю також був застосований комплексний аналіз біогенного навантаження з використанням двох концептуальних моделей MONERIS і GREEN та процес-орієнтованої моделі SWAT [19].

В Україні застосування модельного підходу лише розвивається. У межах Міжнародного Альянсу Водних Досліджень Саксонія [15], були досліджені гідрологічні та гідрохімічні процеси у басейні річки Західний Буг, використовуючи модель MONERIS для аналізу стоку біогенних елементів. Зокрема, за допомогою моделі MONERIS було виконано оцінку потоків води та біогенних речовин у масштабі річкового водозбору Західного Бугу за умов дефіциту даних [26]. Для умов України також виконано налаштування моделі SWAT, а результати її практичного застосування для річкових басейнів можна знайти у роботі [23].

Метою даного дослідження є визначення кількісних параметрів та основних шляхів надходження біогенного навантаження у басейні річки Сула, встановлення ролі точкових та дифузних джерел у його формуванні.

Матеріали та методи дослідження. У міжнародній практиці для оцінки викидів біогенних елементів найчастіше використовують математичні моделі. Найбільш розповсюдженою є процес-орієнтована модель SWAT [1]. В Європі широкого застосування набула напівемпірична концептуальна модель MONERIS [6]. Обидві моделі надають високу просторову та часову дискретність результатів, а також створюють можливість для прогнозування [19]. Разом з тим, застосування будь-якої моделі потребує великого обсягу вхідних даних, кваліфікованого персоналу та тривалого процесу калібрування і верифікації моделі.

Разом із модельним підходом широко використовується й простіший розрахунковий метод, що успішно використовується в межах управління водними ресурсами річкових басейнів [4, 7, 12, 32, 33, 48].

Незважаючи на різницю в обсязі загального бюджету біогенних елементів, обидва методичні підходи досить точно оцінюють відносну роль окремих чинників навантаження.

Вибір між вказаними вище підходами залежить від конкретних завдань. У нашому випадку завдання полягало в оцінці емісії, ґрунтуючись саме на розрахунку балансовим методом.

Розрахунок загального балансу біогенних елементів у межах досліджуваного водозбору проводився за таким підходом [22]:

$$E_{N,P} = (E_{N,P \text{ насел.}} + E_{N,P \text{ індустр.}} + E_{N,P \text{ ліс}} + E_{N,P \text{ луки}} + E_{N,P \text{ орні}} + E_{N,P \text{ забудов.}} + E_{N,P \text{ атм.}} + E_{N,P \text{ індивід. насел.}} + E_{N,P \text{ ероз.}}) \cdot (1 - K_{\text{утр.}}), \quad (1)$$

де $E_{N,P \text{ насел.}}$ – емісійний потік біогенних елементів через очисні споруди міських агломерацій; $E_{N,P \text{ індустр.}}$ – потік біогенних елементів через очисні споруди промислових і сільськогосподарських підприємств; $E_{N,P \text{ ліс}}$ – емісійний потік біогенних елементів з територій, вкритими лісами; $E_{N,P \text{ луки}}$ – потік біогенних елементів з територій під трав'яною рослинністю (луки, пасовища); $E_{N,P \text{ орні}}$ – потік біогенних елементів, який формується з територій під орними землями; $E_{N,P \text{ забудов.}}$ – потік біогенних елементів, який формується від забудованих територій; $E_{N,P \text{ атм.}}$ – потік біогенних елементів за рахунок випадіння атмосферних опадів; $E_{N,P \text{ індивід. насел.}}$ – потік біогенних елементів від домогосподарств, які не підключені до каналізаційних споруд і відводять стічні води у індивідуальні водопроникні відстійники; $E_{N,P \text{ ероз.}}$ – емісійний потік біогенних елементів, внаслідок процесу ерозії; $K_{\text{утр.}}$ – безрозмірний коефіцієнт утримання, що характеризує сумарну дію усіх процесів внутрішньоводоймової трансформації.

Коефіцієнт утримання $K_{\text{утр.}}$ розраховувався відповідно до зазначених формул [2]:

$$K_{\text{утр}N_{\text{заг}}} = \frac{1}{1+4,74 \cdot e^{0,067T \cdot HL^{-1}}}, \quad (2)$$

$$K_{\text{утр}P_{\text{заг}}} = \frac{1}{1+13,3 \cdot HL^{-0,93}}, \quad (3)$$

де T – температура води, °C, HL – гідравлічне навантаження, м/рік.

Серед точкових джерел розглядалося відведення біогенних елементів із стічними водами комунальних, промислових та сільськогосподарських підприємств. Як відомо, внесок із дифузних джерел у водні об'єкти передусім регулюється різноманіттям ландшафту водозбірної площі [17]. Земний покрив водозбірної площі було рекласифіковано на п'ять основних класів: ліси, луки і пасовища, орні землі, забудовані території, водна поверхня [22].

В якості вхідних даних для розрахунків використано різні джерела інформації (табл. 1).

Таблиця 1. Джерела вихідних даних для оцінки навантаження біогенними елементами

Джерело	Параметри	Посилання	Часовий зріз даних
Портал електронних послуг Державного агентства водних ресурсів України	Внесок біогенних елементів від точкових джерел та ідентифікація наявних комунальних очисних споруд	e-services.davr.gov.ua [42]	2020
Атлас адміністративно-територіального устрою України	Чисельність населення	Остапенко та ін., 2021 [31]	2020
The International Benchmarking Network (IBNET)	Ступінь підключення населення до комунальних очисних споруд	https://www.ib-net.org/ [27]	-

Джерело	Параметри	Посилання	Часовий зріз даних
Esri Land Use/Land Cover (LULC) (10 м)	Площі та типи землекористування	Karra et al., 2021 [16]	2020
DEM SRTM (30 м)	Середній похил водозбору	NASA JPL, 2013 [20]	-
Global Soil Erosion Modelling (GloSEM) (100 м)	Ерозійні втрати ґрунтів	Borrelli et al., 2022 [8]	2019
OpenStreetMap (OSM)	Середня довжина водотоків та площа водної поверхні	https://download.geofabrik.de/ [21]	-
Карта річної кількості опадів з урахуванням аеродинамічної поправки	Річна сума опадів	Осипов та ін., 2021 [40]	1990-2019
Агро-гідрологічна модель річкових басейнів України, Land & Water	Середньорічні показники шару водного стоку	https://landwater.uhmi.org.ua/ [18]	2020
Центральна геофізична обсерваторія (ЦГО)	Середня за рік концентрація біогенних елементів в опадах Температура води Витрати води Хімічний склад води	http://cgo-sreznovskyi.kyiv.ua/ [49]	2016-2017 1991-2016 2019 2019
Оцінка навантаження поверхневих водних об'єктів біогенними елементами	Концентрації біогенних елементів та коефіцієнти емісії забруднюючих речовин на одну особу	Behrendt et al., 2000 [5] Osadcha et al., 2022 [22]	-

Виклад основного матеріалу

1. Коротка характеристика басейну. Річка Сула – це ліва притока Дніпра, довжиною 363 км, яка протікає територією трьох областей України, і впадає у Сулинську затоку Кременчуцького водосховища (Рис. 1). Річковий басейн площею 19 600 км² розташований у межах Дніпрово-Донецької западини з потужним осадовим чохлам палеозой-кайнозойського віку. У геоморфологічному аспекті річковий басейн розташований переважно в межах Придніпровської низовини та Полтавської рівнини. Клімат басейну помірно-континентальний. Середньорічна температура повітря зменшується у північно-східному напрямку від 9,2 °С до 7,8 °С. Взимку температури коливаються від -2,6 °С до -4,3 °С, а влітку – від +19,5 °С до +20,8 °С. Рослинний покрив характеризується низьким рівнем залісненості території басейну – приблизно 14 %. У долинах річок поширені луки, а на межиріччях природна рослинність майже не зберіглася. Найпоширенішими ґрунтами басейну Сули є чорноземи типові малогумусні та слабогумусні, які є високопродуктивними для сільськогосподарських потреб. Сула має змішаний тип живлення з переважанням снігового. У межах досліджуваного басейну станом на 2020 рік проживало 523,5 тис. осіб, з них більшість у селах. Найбільшими містами є Ромни, Лубни та Прилуки з населенням відповідно ~39 тис. осіб, ~45 тис. осіб та ~53 тис. осіб.

Антропогенне навантаження в басейні обумовлене сільськогосподарським використанням, урбанізацією та водокористуванням. До руслової мережі відводяться стічні води комунальних та промислових підприємств різних галузей господарювання. Зокрема, у басейні працюють підприємства з нафтогазовидобування, машинобудування, будівельних матеріалів, фармацевтичні та харчові. Проводиться інтенсивне розведення худоби. Також водні ресурси р. Сула використовуються для водозабезпечення населених

пунктів, рекреації, рибництва. Сулинська затока є зоною нересту цінних видів риби та місцем їхнього найбільшого промислового скупчення. Протягом тривалого часу у зазначеній затоці відзначаються значні екологічні проблеми, часті випадки критичного зниження вмісту у воді розчиненого кисню, наслідком чого є масова загибель риби.

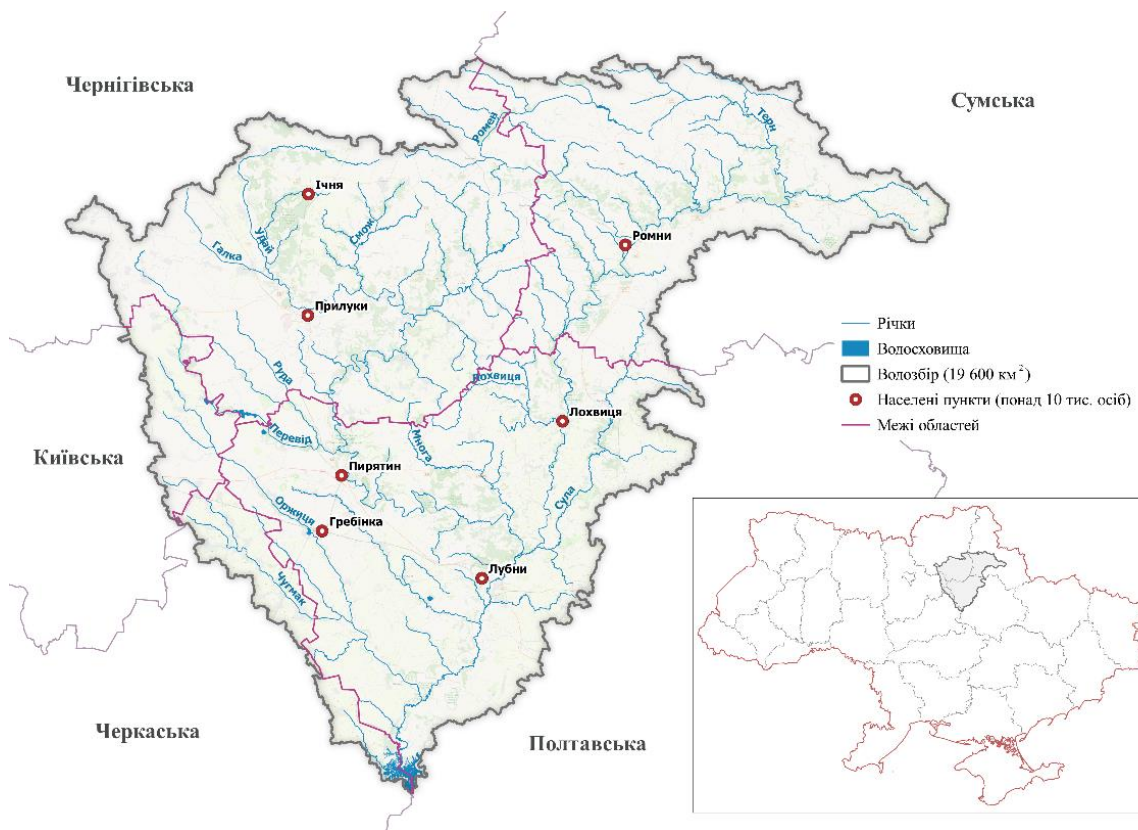


Рис. 1. Географічне положення басейну річки Сула

2. Розрахунок навантаження від точкових джерел. Інформація про вплив точкових джерел обліковується на державному рівні і враховує лише водокористувачів, які споживають понад 20 м³ води на добу. Для точкових джерел ми окремо визначали навантаження від комунальних та промислових підприємств. Зокрема, в басейні Сули знаходяться 8 комунальних та 3 промислові підприємства (рис. 2). Для оцінки внеску біогенних елементів від вказаних підприємств в межах басейну використано Портал електронних послуг Державного агентства водних ресурсів України [42].

Забруднення поверхневих вод біогенними елементами від точкових джерел насамперед пов'язане з відведенням стічних вод населених пунктів (НП). У басейні Сули знаходиться 1141 НП (табл. 2).

Таблиця 2. Розподіл населення в межах басейну Сули станом на 2020 рік

НП з чисельністю населення:	Кількість НП	Чисельність населення в межах НП	Частка населення від загальної чисельності, %
< 2 тис. осіб	1116	273032	52,2
2 - 10 тис. осіб	18	65087	12,4
> 10 тис. осіб	7	185277	35,4

З таблиці 2 слідує, що у досліджуваному нами басейні домінує сільське населення (НП < 2 тис. осіб). Села в Україні зазвичай не мають систем централізованого збору стічних вод. Трохи більше третини населення проживає у середніх містах з населенням понад 10 тис. осіб. Стічні води у таких агломераціях збираються та очищуються.



Рис. 2. Розташування підприємств забруднювачів поверхневих вод: 1 – КП ВКГ «Ічень»; 2 – КП «Прилуки тепловодопостачання»; 3 – КП «Господар»; 4 – КП «Пирятинські госпрозрахункові очисні споруди»; 5 – КП «Лубни-водоканал»; 6 – КП «Сяйво»; 7 – ДП «Сток-Сервіс» ПП «Еліпс»; 8 – КП «Недригайлівводосервіс»; 9 – ПАТ «Линовицький цукрокомбінат «Красний»; 10 – Філія ПРАТ «Слобожанська будівельна кераміка»; 11 – ДУ «Роменська виправна колонія (№56)»

Надходження біогенних елементів від населення, підключеного до очисних споруд, розраховано за наступною формулою:

$$E_{N,P \text{ насел.}, \text{ кг рік}^{-1}} = N \cdot r \cdot \text{ex}_{N,P} \cdot j, \quad (4)$$

де $E_{N,P \text{ насел.}}$ – емісія біогенних елементів від населення, що відводить стічні води на очисні споруди, кг рік^{-1} ; N – загальна чисельність міського населення у межах річкового водозбору, чол.; r – частка міського населення, що обслуговується централізованою каналізацією; $\text{ex}_{N,P}$ – показник екскреції N і P від однієї людини, $\text{г доба}^{-1} \text{чол}^{-1}$; j – ступінь видалення біогенних елементів очисними спорудами, %.

Згідно з розрахунками, навантаження біогенними елементами від населення, підключеного до каналізаційних систем, становить 161,9 т/рік для нітрогену та 40,9 т/рік для фосфору. Найбільшим забруднювачем стічними водами, за даними [42], є комунальне підприємство водно-каналізаційного господарства «Прилуки тепловодопостачання», м. Прилуки.

Станом на кінець 2020 року з промисловими стічними водами в поверхневі води басейну Сули надходило 6,5 тон N та 0,3 тони P на рік. Найбільшим забруднювачем у басейні Сули є АТ «Линовицький цукрокомбінат «Красний»», його стічні води містять приблизно 68 % нітрогену та близько 77 % фосфору від загальної їх кількості.

Отже, загальне навантаження від точкових джерел у басейні р. Сули становить 168,4 т/рік для нітрогену та 41,2 т/рік для фосфору і визначається передусім внеском міського населення. Частка промислових та сільськогосподарських підприємств становить 4 % для нітрогену та 1 % для фосфору.

3. Розрахунок навантаження від дифузних джерел. Внесок дифузних джерел визначається низкою чинників. Обрахунок дифузних джерел забруднення був комплексним і враховував основні шляхи надходження біогенних елементів: від сільського населення (яке не має доступу до каналізаційних систем), лісів, лук і пасовищ, емісії від забудованих територій, від випадіння атмосферних опадів, а також потоки, що змиваються з орних земель.

Розглянемо забруднення, сформоване населенням, яке не має доступу до каналізаційних мереж, передусім це населення сільських НП з чисельністю < 2 тис. осіб та частково міського населення, яке не має систем збору та відведення стічних вод (рис. 3).

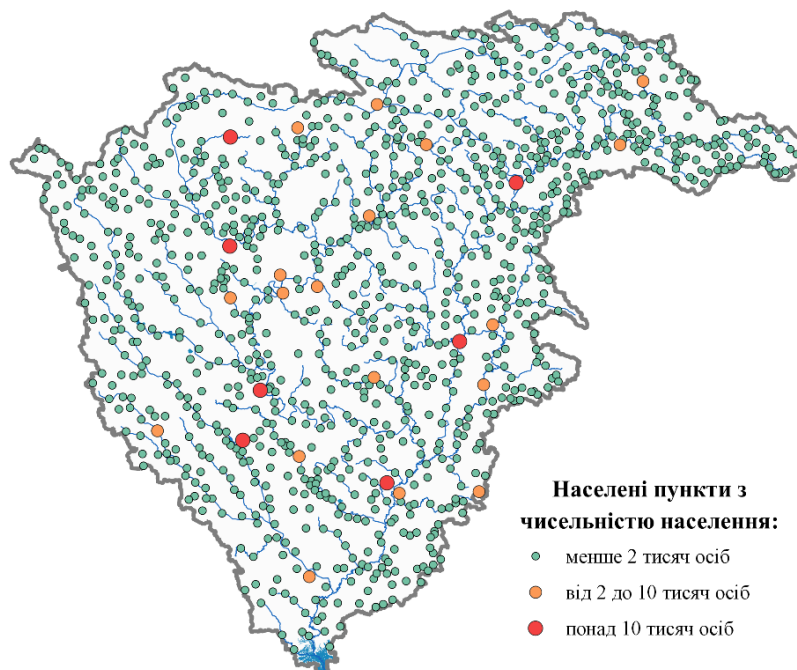


Рис. 3. Розподіл населення в межах басейну Сули станом на 2020 рік

Загальне навантаження біогенними елементами від населення, не підключеного до каналізаційних мереж, розраховано за формулою:

$$E_{N,P} \text{ індивід. насел.}, \text{ кг рік}^{-1} = N \cdot \text{ex}_{N,P} \cdot (1-k), \quad (5)$$

де $E_{N,P}$ індивід. насел. – загальне надходження від домогосподарств без каналізації; N – чисельність населення, що відводить стічні води в індивідуальні відстійники, чол.; $\text{ex}_{N,P}$ – показник екскреції N і P від однієї людини, г доба⁻¹ чол⁻¹; k – безрозмірний коефіцієнт утримання ґрунтами.

Проведені розрахунки показали, що навантаження від даного типу населення становить 229,1 т/рік нітрогену та 23,5 т/рік фосфору.

Для розрахунку емісії біогенних елементів у різних типах ландшафтів (ліси, луки, пасовища, забудовані території, рілля) використано тематичну класифікацію наземного покриття Esri Land Cover (табл. 3). Близько 3/4 басейну Сули займає рілля, що сприяє інтенсивному вимиванню біогенних елементів та ерозії ґрунту.

Таблиця 3. Розподіл типів земного покриття станом на 2020 рік

Індекс (Value)	Land Cover	Тип земного покриття	%
1	Water	Водойми	0,6
2	Trees	Ліси	13,9
4	Flooded Vegetation	Болота	0,3
5	Crops	Орні землі	73,4
7	Built Area	Урбанізовані території	3,9
8	Bare Ground	Голі землі	-
11	Rangeland	Пасовища	7,9

Примітка: * земний покрив розраховано на основі ESRI Land Cover [16]

Для розрахунку стоку біогенних елементів з лісових масивів застосовано рівняння

$$E_{N,P \text{ ліс}, \text{ кг рік}^{-1}} = F_{\text{ліс}} \cdot h \cdot C, \quad (6)$$

де $F_{\text{ліс}}$ – площа території водозбору під лісами, км²; h – середній за рік шар водного стоку, мм; C – концентрація біогенних елементів ($N_{\text{заг}}$, $P_{\text{заг}}$) у водному стоці з території лісових масивів, мг N,P дм⁻³.

Отриманий результат показав, що з територій, вкритих лісами, вимивається 47,1 т/рік нітрогену та 3,4 т/рік фосфору.

Розрахунок стоку біогенних елементів з територій, вкритих трав'янистою рослинністю, виконано за формулою:

$$E_{N,P \text{ луки}, \text{ кг рік}^{-1}} = F_{\text{луки}} \cdot h \cdot C, \quad (7)$$

де $F_{\text{луки}}$ – площа території водозбору під луками і пасовищами, км²; h – середньорічний шар водного стоку, мм; C – концентрація біогенних елементів у водному стоці, сформованому на території лук і пасовищ, мг N,P дм⁻³.

За розрахунками з лук і пасовищ у водойми щорічно надходить 60,9 т/рік нітрогену та 5 т/рік фосфору.

Надходження на водну поверхню з атмосферними опадами розраховано за формулою:

$$E_{N,P \text{ атм.}, \text{ кг рік}^{-1}} = F_{\text{водн. пов.}} \cdot P \cdot C, \quad (8)$$

де $F_{\text{водн. пов.}}$, км²; P – річна сума опадів, мм; C – середня за рік концентрація біогенних елементів в опадах, мг N,P дм⁻³.

Відповідно до розрахунків з атмосферними опадами на поверхню басейну надходить 43,4 т/рік нітрогену. Зі свого боку надходження фосфору з атмосферними опадами мінімальне [43], і за нашими розрахунками становить 0,2 т/рік фосфору.

Кількість забруднюючих речовин на забудованих територіях визначається накопиченим пилом, сухими осадженнями з атмосфери та сміттям, що змиваються під час формування злив, і обчислювалося за формулою:

$$E_{N,P \text{ забудов.}, \text{ кг рік}^{-1}} = F_{\text{забудов.}} \cdot h \cdot C, \quad (9)$$

де $F_{\text{забудов.}}$ – площа забудованої території, км²; інші позначення аналогічні до формул (6) та (7). Концентрації $N_{\text{заг}}$ та $P_{\text{заг}}$ у зливовому стоці міських агломерацій, мг N,P дм⁻³.

За розрахунками навантаження біогенними елементами від забудованих територій становить 42,9 т/рік нітрогену та 3,7 т/рік фосфору.

Навантаження від орних земель визначається балансом нітрогену (фосфору) в агросистемі, який складається протягом року. При цьому коефіцієнт вилучення біогенних елементів залежить від багатьох показників, серед яких варто вказати на фізико-хімічні властивості ґрунтів, агротехнічні заходи, а також ландшафтні особливості й величина річкового басейну. Залежно від місцевих умов він варіює в межах 0,08-0,8 для нітрогену та 0,0001-0,1 для фосфору. Коефіцієнт вилучення визначали шляхом калібрування на основі річного стоку біогенних елементів у басейні р. Сули, розрахованого з використанням даних моніторингових спостережень. Отримані значення хімічного стоку нітрогену і фосфору перетворено в показники емісії за допомогою коефіцієнта утримання, розрахованого згідно з методологією [22, 28].

Отримане таким чином значення емісії біогенних елементів з орних земель складає 326,4 т/рік нітрогену та 220,8 т/рік фосфору. Це становить ~35 % від загальної кількості емісії нітрогену і ~70 % фосфору в межах басейну. Такі високі показники можуть бути пов'язані зі значною розораністю території басейну, що перевищує 70 % його площі.

Для оцінки впливу ерозійних процесів (водної ерозії) на емісію біогенних елементів використано методику, яка базується на аналізі показника ерозії ґрунтів та визначенні вмісту нітрогену та фосфору в твердій фазі ґрунту. Розрахунок проводився за формулою:

$$E_{N,P \text{ ероз.}, \text{ кг рік}^{-1}} = EG \cdot C_{(N,P)\text{грунт}}, \quad (10)$$

де EG – показник ерозійних процесів, т рік^{-1} , $C_{(N,P)\text{грунт}}$ – вміст сполук нітрогену і фосфору в ґрунтах, мг кг^{-1} .

Унаслідок ерозійних процесів із території басейну Сули формується емісійний потік, який для нітрогену та фосфору становить 3 т/рік і 15,1 т/рік, відповідно.

Отже, загальна емісія біогенних елементів у межах басейну Сули становить 921 т/рік нітрогену та 313 т/рік фосфору (рис. 4; рис. 5).

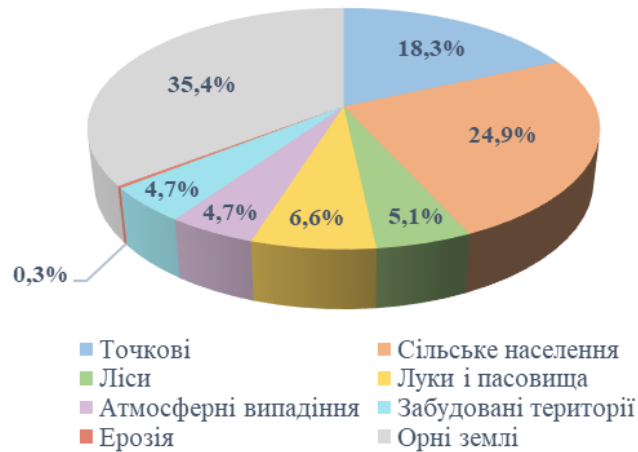


Рис. 4. Основні джерела емісії нітрогену в межах басейну Сули

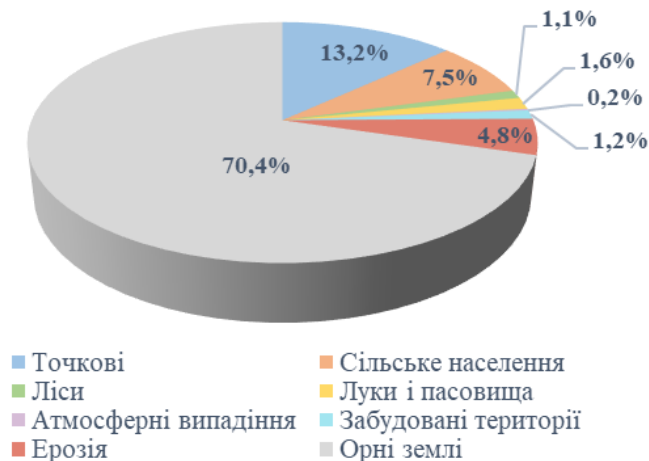


Рис. 5. Основні джерела емісії фосфору в межах басейну Сули

4. Коефіцієнт утримання сполук нітрогену і фосфору. Як відомо, емісійний потік біогенних елементів піддається різноманітним біологічним, хімічним та фізико-хімічним процесам. Унаслідок цього, дані моніторингових спостережень зазвичай є меншими від значень розрахованого навантаження. Тому для оцінки винесення біогенних елементів використовують показник басейнового утримання ($K_{\text{утр}}$), який відображає різницю між загальною кількістю біогенних елементів, що потрапляє в басейн із різних джерел, та кількістю, яка в результаті виноситься з басейну водним стоком у головне русло.

Загалом, процеси утримання охоплюють нітрифікацію-денітрифікацію, поглинання рослинами та седиментацію, і їх ефективність може значно варіюватися залежно від гідрологічних, геоморфологічних та кліматичних умов басейну. Для нітрогену домінуючим процесом утримання є денітрифікація, тоді як для фосфору – седиментація [29].

Модель щодо розрахунку коефіцієнта утримання розроблена [2], проте в цій роботі використано її адаптований варіант [22].

Таким чином, у межах басейну коефіцієнт утримання, розрахований за формулами (2, 3), становить для нітрогену 0,71 (71 %), для фосфору – 0,57 (57 %). Такі результати узгоджуються з даними проведених досліджень [10], де серед 13 водозбірних басейнів варіабельність показника утримання становила 23-84 % для нітрогену та 39-72 % для фосфору.

5. Річний стік біогенних елементів. Отже, загальний емісійний потік у межах басейну становить 921 т/рік або 0,05 т/км² нітрогену та 313 т/рік або 0,017 т/км² фосфору. Виходячи із розрахованих значень коефіцієнту утримання, до головного русла потрапляє 29 % нітрогену та 43 % фосфору. У такий спосіб, річний стік сполук нітрогену та фосфору складає 273 та 135 тон відповідно (рис. 6).

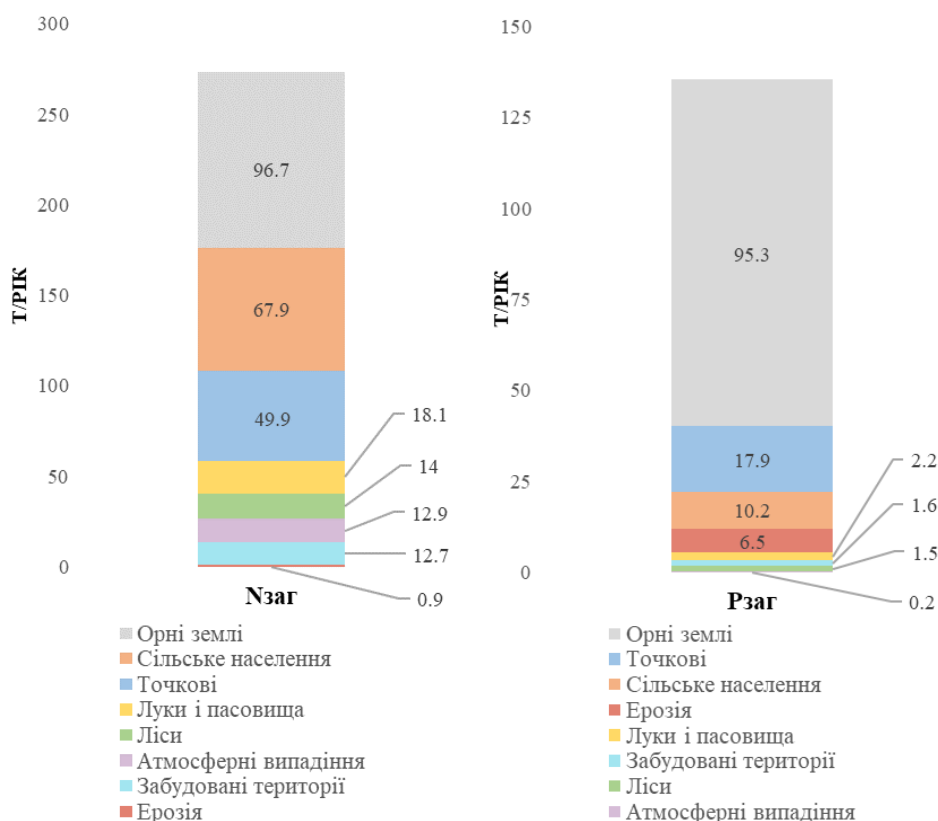


Рис. 6. Річний стік сполук нітрогену (N_{заг}) та фосфору (P_{заг}) з урахуванням коефіцієнту утримання

6. Аналіз та узагальнення результатів. Із території басейну Сули формується стік сполук нітрогену, який складає 273 т/рік. За джерелами основного надходження емісія нітрогену розподіляється у такий спосіб: понад ~35 % надходить з території орних земель, 25 % – від населення, що немає доступу до каналізаційних систем, та близько 18 % – за рахунок точкових джерел.

Зі свого боку загальне навантаження річки Сула сполуками фосфору становить 135 т/рік. За джерелами надходження загальний стік фосфору розподіляється у такий спосіб: домінуюча частка – ~70 % – надходить за рахунок орних земель, 13 % – формується за рахунок точкових джерел, тоді як від населення, що немає доступу до каналізаційних систем надходить 7 %, а від ерозії – 5 %.

Настільки велика частка надходжень сполук нітрогену та фосфору з орних земель спричинена передусім високим показником розораності басейну – більше 70 %. Надходження біогенних елементів від населення пов'язано з відсутністю каналізаційних систем (понад 80 %), а значне надходження нітрогену та фосфору від точкових джерел обумовлені недостатньою очисткою стічних вод та широким використанням фосфатовмісних миючих засобів.

Результати аналізу басейну Сули корелюються з такими для басейну Тетерева [46], де розподіл забруднення від різних джерел у відсотковому співвідношенні близький до отриманого нами, однак зі значно більшою роллю навантаження від лісів як результату високого показника лісистості. На противагу цьому, головним джерелом емісії біогенних елементів у басейнах Сіверського Дінця, Нижнього Дунаю і Дністра визначено орні землі [36, 38]. Подібні результати було отримано й для басейнів інших річок Європи [9, 30].

Аналіз отриманих результатів вказує на високі рівні забруднення біогенними елементами, що в подальшому спричиняє евтрофікацію водойм. Такий стан загрожує водним екосистемам, знижуючи біорізноманіття та негативно впливаючи на рибне господарство. Серйозні наслідки також включають зниження якості води, що впливає на її використання для пиття, сільськогосподарських потреб та рекреації. У Сулинській затоці Кременчуцького водосховища, куди впадає Сула, процеси евтрофікації проявляються найвиразніше. У праці [44] головною причиною інтенсивної евтрофікації цієї затоки визначено зменшення стоку Сули як наслідок експлуатації нафтогазових свердловин у її басейні, що викликає зниження водного стоку. Наші дослідження показують, що основним джерелом евтрофікації є великі об'єми біогенних елементів, які надходять з різних джерел водозбірному басейну. У результаті цього актуальною стає потреба в інтегрованому управлінні водними ресурсами, яке повинно ґрунтуватися на розробці ефективних методів очищення стічних вод, строгому контролю промислових викидів і впровадженні екологічно стійких аграрних технологій. Також важливо забезпечити регулярний моніторинг якості води, щоб мінімізувати негативний вплив на екосистему річки.

Висновки.

- Фосфор і нітроген є ключовими елементами для підтримки харчових ланцюгів у водних екосистемах, але їх надлишок веде до евтрофікації водойм, викликаючи ряд вторинних несприятливих процесів у водних екосистемах. Оцінка реального обсягу біогенних елементів, що надходять у басейн річки, повинна включати як точкові, так і дифузні джерела.

- Антропогенне навантаження біогенними елементами у басейні річки Сула складає 921 т/рік або 0,05 т/км² для нітрогену та 313 т/рік або 0,017 т/км² для фосфору. Однак, природні процеси (передусім нітрифікація-денітрифікація та седиментація) визначають значне утримання біогенних елементів на шляху їх міграції, тому безпосередньо до Сули потрапляє 273 т/рік нітрогену та 135 т/рік фосфору.

- Головним джерелом забруднення Сули сполуками нітрогену та фосфору є надходження з орних земель – 96,7 т/рік (~35 %) та 95,3 т/рік (~70 %), відповідно. Іншим значним джерелом забруднення сполуками нітрогену в басейні Сули є надходження від населення, не підключеного до каналізаційних мереж (67,9 т/рік), тоді як сполуки фосфору значною мірою потрапляють від точкових джерел забруднення (17,9 т/рік) внаслідок неефективних очисних споруд.

- Результати дослідження підкреслюють необхідність комплексного підходу до управління водними ресурсами, який щонайменше повинен включати розрахунки навантаження водозбірних басейнів біогенними елементами від дифузних джерел забруднення. Важливо розуміти співвідношення джерел забруднення для розробки ефективних стратегій зниження антропогенного навантаження та пошуку новітніх технологічних рішень для цього.

Список літератури

1. Arnold J., Moriasi D., Gassman P., Abbaspour K., White M., Srinivasan R., Santhi C., Harmel R., van Griensven A., Van Liew M., Kannan N., Jha M. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. Transactions of the ASABE. 2012. 55(4). P. 1491–1508.

2. Behrendt D., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. Hydrobiologia. 1999. 410. P. 111–122.

3. Behrendt H. Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads — a comparison for different river basins in Central Europe. Water Science and Technology. 1996. 33(4-5). P. 99–107. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00219-3](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00219-3)

4. Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra River system. Germany, Weissensee Verlag. 2005. 337 p.

5. Behrendt H., Huber P., Kornmilch M., Opitz D., Schmoll O., Scholz G., Uebe R. Nutrient emissions into river basins of Germany. UBA-Texte 23/00. 2000. 266 p.
6. Behrendt H., Venohr M., Hirt U., Hofmann J., Opitz D., Gericke, A. The model system MONERIS, version 2.0. User's manual. Berlin, Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries in the Forschungsverbund Berlin eV. 2007. 117 p.
7. Bojanowski D., Orlińska Woźniak P., Wilk P., Szalińska E. Estimation of nutrient loads with the use of mass balance and modelling approaches on the Wełna River catchment example (central Poland). Scientific Reports. 2022. 12(13052). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17270-4>
8. Borrelli P., Ballabio C., Yang J., Robinson D., Panagos P. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion. Scientific Data. 2022. 9(406). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01489-x>
9. Česonienė L., Šileikienė D., Dapkienė M. Influence of Anthropogenic Load in River Basins on RiverWater Status: A Case Study in Lithuania. Land. 2021. 10(1312). DOI: <https://doi.org/10.3390/land10121312>
10. De Klein J. From Ditch to Delta. Nutrient retention in running waters. Wageningen, PhD-thesis Wageningen University. 2008. 194 p.
11. Drolc A., Zagorc Koncan J., Tisler T. Evaluation of Point and Diffuse Sources of Nutrients in a River Basin on Base of Monitoring Data. Environmental Monitoring and Assessment. 2007. 129(1-3), P. 461–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9376-5>
12. HELCOM. Guidelines for the compilation of waterborne pollution load to the Baltic Sea (PLC-water). Helsinki. 2007. 80 p.
13. Howarth R.W., Sharpley A., Walker D. Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: Implications for achieving coastal water quality goals. Estuaries. 2002. 25(4). P. 656–676. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02804898>
14. International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR). Danube River Basin Management Plan (DRBMP). 2021. 290 p.
15. International Water Alliance Saxony (IWAS). URL: <https://www.ufz.de/iwas-sachsen/index.php?en=17427>
16. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J.C., Mathis M. Brumby S.P. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. Brussels, Proceedings of the 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. 2021.
17. Kuuppo P. River biogeochemistry and source identification of nitrate by means of isotopic tracers in the baltic Sea catchments. Biogeoscience. 2006. 3. P. 663–676.
18. Land & Water. Агро-гідрологічна модель річкових басейнів України. URL: <https://landwater.uhmi.org.ua/>
19. Malagò A., Venhor M., Gericke A., Vigiak O., Bouraoui F., Grizzetti B., Kovacs A. Modelling nutrient pollution in the Danube River Basin: a comparative study of SWAT, MONERIS and GREEN models. Belgium, Publications Office of the European Union. 2015. DOI: <https://doi.org/10.2788/156278>
20. NASA JPL. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1N.003>
21. OpenStreetMap Data Extracts. Geofabrik's download server. URL: <https://download.geofabrik.de/>
22. Osadcha N.M., Luzovitska Yu.A., Ukhan O.O., Biletska S.V., Osypov V.V., Bonchkovsky A.S., Nabyvanets Yu.B., Osadchyi V.I. Methodology for Assessing the Surface Water Pollution by Nutrients. Ukrainian Geographical Journal. 2022. 4. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.04.037>
23. Osypov V., Osadcha N., Osadchyi V. SWAT Model Application for Simulating Nutrients Emission from an Agricultural Catchment in Ukraine. Forum Geografic. 2016. 15(2). P. 30–38. DOI: <https://doi.org/10.5775/fg.2016.041.s>
24. Pöthig R., Behrendt H., Opitz D., Furrer G. A universal method to assess the potential of phosphorus loss from soil to aquatic ecosystems. Environmental Science and Pollution Research. 2010. 17(2). P. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0230-5>
25. Savic R., Stajic M., Blagojević B., Bezdán A., Vranesevic M., Nikolić Jakanović V., Baumgertel A., Bubalo Kovačić M., Horvatinec J., Ondrasek G. Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Their Ratios as Indicators of Water Quality and Eutrophication of the Hydro-System Danube–Tisza–Danube. Agriculture. 2022. 12(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12070935>
26. Terekhanova T. Quantification of water and nutrient flows on a river catchment scale under scarce data conditions (A case study of Western Bug river basin, Ukraine). Dresden, MSc Thesis Dresden University of Technology, 2009. 85 p.
27. The International Benchmarking Network (IBNET). URL: <https://www.ib-net.org/>

28. Venohr M., Behrendt H., Hirt U., Hofmann J., Opitz D., Scherer U., Fuchs S., Wander R. Modellierung von Einträgen, Retention und Frachten in Flusssystemen mit MONERIS. Teil III. Nährstoffe - Modellergebnisse. Schriftenreihe. 2008. P. 87–98.
29. Venohr M., Hirt U., Hofmann J., Opitz D., Gericke A., Wetzig A., Natho S., Neumann F., Hürdler J., Matranga M., Mahnkopf J., Gadegast M., Behrendt H. Modelling of Nutrient Emissions in River Systems - MONERIS - Methods and Background. International Review of Hydrobiology. 2011. 96(5). P. 435–483. DOI: <https://doi.org/10.1002/iroh.201111331>
30. Voss M., Dippner J.W., Humborg C., Hürdler J., Korth F., Neumann T., Schernewski G., Venohr M. History and scenarios of future development of Baltic Sea eutrophication. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2011. 92(3). P. 307–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.12.037>
31. Атлас адміністративно-територіального устрою України / За заг. ред. Остапенка П. / видання друге, доповнене. Проєкт «Підтримка належного врядування в місцевих громадах як складової реформи децентралізації» Координатора проєктів ОБСЄ в Україні. Київ, Міністерство розвитку громад та територій України, Товариство дослідників України. 2021. 441 с.
32. Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты. Региональная экология. 2011. 3-4. С. 50–59.
33. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Детерминировано-стохастическое моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты (на примере Финского залива Балтийского моря). СПб.: Нестор-История. 2013. 36 с.
34. Лузовіцька Ю.А., Кошкіна О.В., Осадча Н.М. Вплив водного стоку на формування вносу біогенних елементів у басейні річки Десни. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2014. 2(33). С. 37–45.
35. Медінець С.В., Медінець В.І., Моклячук Л.І., Уткіна К.Б., Говард К., Самтон М.А. Створення системи оцінки азотного навантаження у басейні Дністра. Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна. Серія «Екологія». 2017. 16. С. 123–131.
36. Осадча Н.М., Осадчий В.І., Ухань О.О., Клебанов Д.О., Лузовіцька Ю.А., Білецька С.В. Антропогенне навантаження біогенними елементами на поверхневі води басейнів нижнього Дунаю, Дністра та Пруту. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2019. 3. С. 77–78.
37. Осадча Н.М., Осійський Е.Й., Скоблей М.П., Ухань О.О., Ярошевич О.Є. Аналіз основних антропогенних навантажень та їхніх впливів у районі річкового басейну Сіверського Дінця. 2018. 68 с.
38. Осадча Н.М., Ухань О.О., Чехній В.М., Голубцов О.Г. Оцінка емісії біогенних елементів та органічних речовин у поверхневі води басейну р. Сіверський Донець від дифузних джерел. Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології. Монографія. К.: Ніка-центр. 2019. С. 192–200.
39. Осадчий В.І., Осадча Н.М., Мостова Н.М. Вплив урбанізованих територій на формування хімічного складу поверхневих вод басейну Дніпра. Наукові праці УкрНДГМІ. 2002. 250. С. 242–261.
40. Осипов В.В., Бончковський А.С., Орещенко А.В., Ошурок Д.О., Осадча Н.М. Обчислення кількості опадів на українських метеостанціях із врахуванням впливу вітру. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». 2021. 55. С. 204–215. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-15>
41. Піциль А.О. Оцінка забруднення поверхневого стоку та його вплив на якість водних джерел на міських ландшафтах. Вісник ЖНАЕУ. 2012. 1(1). С. 391–401.
42. Портал електронних послуг Державного агентства водних ресурсів України. URL: <https://e-services.davr.gov.ua/>
43. Соломатіна В.Д., Пінкіна Т.В., Світельський М.М. Матковська С.І., Іщук О.В., Федючка М.М. Взаємозв'язок фосфорно-кальцієвого режиму водойм з їхньою біопродуктивністю (огляд). Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки». 2019. 1(85). С. 105–123.
44. Стародубцев В.М., Фесенко Н.В., Власенко І.С., Сергієнко А.Ю. Актуальні екологічні процеси в Сулинській затоці Кременчуцького водосховища. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2013. 2(38).
45. Технічний звіт EUWI+EAST-UA-14 «Розроблення плану управління басейну Дніпра в межах України: фаза 1, крок 2 - Аналіз антропогенного навантаження та його впливу, оцінка ризику, екологічні цілі для масивів поверхневих вод». 2020. 132 с.
46. Ухань О.О., Осадча Н.М. Оцінка антропогенного навантаження біогенними елементами та органічними речовинами у басейні р. Тетерів. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2021. 1(59). С. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.6>
47. Хільчевський В.К. Роль агрохімічних засобів у формуванні якості вод басейну Дніпра. К.: ВПЦ«Київський університет». 1996. 222 с.
48. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометиздат. 1993. 278 с.

References

1. Arnold J., Moriasi D., Gassman P., Abbaspour K., White M., Srinivasan R., Santhi C., Harmel R., van Griensven A., Van Liew M., Kannan N., Jha M. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*. 2012. 55(4). P. 1491–1508.
2. Behrendt D., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. *Hydrobiologia*. 1999. 410. P. 111–122.
3. Behrendt H. Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads — a comparison for different river basins in Central Europe. *Water Science and Technology*. 1996. 33(4-5). P. 99–107. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00219-3](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00219-3)
4. Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra River system. Germany, Weissensee Verlag. 2005. 337 p.
5. Behrendt H., Huber P., Kornmilch M., Opitz D., Schmoll O., Scholz G., Uebe R. Nutrient emissions into river basins of Germany. UBA-Texte 23/00. 2000. 266 p.
6. Behrendt H., Venohr M., Hirt U., Hofmann J., Opitz D., Gericke, A. The model system MONERIS, version 2.0. User's manual. Berlin, Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries in the Forschungsverbund Berlin eV. 2007. 117 p.
7. Bojanowski D., Orlińska Woźniak P., Wilk P., Szalińska E. Estimation of nutrient loads with the use of mass balance and modelling approaches on the Wełna River catchment example (central Poland). *Scientific Reports*. 2022. 12(13052). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17270-4>
8. Borrelli P., Ballabio C., Yang J., Robinson D., Panagos P. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion. *Scientific Data*. 2022. 9(406). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01489-x>
9. Česonienė L., Šileikienė D., Dapkienė M. Influence of Anthropogenic Load in River Basins on RiverWater Status: A Case Study in Lithuania. *Land*. 2021. 10(1312). DOI: <https://doi.org/10.3390/land10121312>
10. De Klein J. From Ditch to Delta. Nutrient retention in running waters. Wageningen, PhD-thesis Wageningen University. 2008. 194 p.
11. Drolc A., Zagorc Koncan J., Tisler T. Evaluation of Point and Diffuse Sources of Nutrients in a River Basin on Base of Monitoring Data. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007. 129(1-3), P. 461–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9376-5>
12. HELCOM. Guidelines for the compilation of waterborne pollution load to the Baltic Sea (PLC-water). Helsinki. 2007. 80 p.
13. Howarth R.W., Sharpley A., Walker D. Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: Implications for achieving coastal water quality goals. *Estuaries*. 2002. 25(4). P. 656–676. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02804898>
14. International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR). Danube River Basin Management Plan (DRBMP). 2021. 290 p.
15. International Water Alliance Saxony (IWAS). URL: <https://www.ufz.de/iwas-sachsen/index.php?en=17427>
16. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J.C., Mathis M. Brumby S.P. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. Brussels, Proceedings of the 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. 2021.
17. Kuuppo P. River biogeochemistry and source identification of nitrate by means of isotopic tracers in the Baltic Sea catchments. *Biogeoscience*. 2006. 3. P. 663–676.
18. Land & Water. Ahro-hidrolohichna model richkovykh baseiniv Ukrainy [Land & Water. Agro-hydrological model of the river basins of Ukraine]. URL: <https://landwater.uhmi.org.ua/>
19. Malagò A., Venhor M., Gericke A., Vigjak O., Bouraoui F., Grizzetti B., Kovacs A. Modelling nutrient pollution in the Danube River Basin: a comparative study of SWAT, MONERIS and GREEN models. Belgium, Publications Office of the European Union. 2015. DOI: <https://doi.org/10.2788/156278>
20. NASA JPL. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1N.003>
21. OpenStreetMap Data Extracts. Geofabrik's download server. URL: <https://download.geofabrik.de/>
22. Osadcha N.M., Luzovitska Yu.A., Ukhan O.O., Biletska S.V., Osypov V.V., Bonchkovsky A.S., Nabyvanets Yu.B., Osadchyi V.I. Methodology for Assessing the Surface Water Pollution by Nutrients. *Ukrainian Geographical Journal*. 2022. 4. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.04.037>

23. Osypov V., Osadcha N., Osadchy V. SWAT Model Application for Simulating Nutrients Emission from an Agricultural Catchment in Ukraine. *Forum Geografic*. 2016. 15(2). P. 30–38. DOI: <https://doi.org/10.5775/fg.2016.041.s>
24. Pöthig R., Behrendt H., Opitz D., Furrer G. A universal method to assess the potential of phosphorus loss from soil to aquatic ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*. 2010. 17(2). P. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0230-5>
25. Savic R., Stajic M., Blagojević B., Bezdán A., Vranesević M., Nikolić Jokačević V., Baumgertel A., Bubalo Kovačić M., Horvatinec J., Ondrasek G. Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Their Ratios as Indicators of Water Quality and Eutrophication of the Hydro-System Danube–Tisza–Danube. *Agriculture*. 2022. 12(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12070935>
26. Terekhanova T. Quantification of water and nutrient flows on a river catchment scale under scarce data conditions (A case study of Western Bug river basin, Ukraine). Dresden, MSc Thesis Dresden University of Technology, 2009. 85 p.
27. The International Benchmarking Network (IBNET). URL: <https://www.ib-net.org/>
28. Venohr M., Behrendt H., Hirt U., Hofmann J., Opitz D., Scherer U., Fuchs S., Wander R. Modellierung von Einträgen, Retention und Frachten in Flusssystemen mit MONERIS. Teil III. Nährstoffe - Modellergebnisse. *Schriftenreihe*. 2008. P. 87–98.
29. Venohr M., Hirt U., Hofmann J., Opitz D., Gericke A., Wetzig A., Natho S., Neumann F., Hürdler J., Matranga M., Mahnkopf J., Gadegast M., Behrendt H. Modelling of Nutrient Emissions in River Systems - MONERIS - Methods and Background. *International Review of Hydrobiology*. 2011. 96(5). P. 435–483. DOI: <https://doi.org/10.1002/iroh.201111331>
30. Voss M., Dippner J.W., Humborg C., Hürdler J., Korth F., Neumann T., Schernewski G., Venohr M. History and scenarios of future development of Baltic Sea eutrophication. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2011. 92(3). P. 307–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.12.037>
31. Atlas administratyvno-terytorialnoho ustroiu Ukrainy [Atlas of the administrative and territorial structure of Ukraine] / Za zah. red. Ostapenko P. / vydannia druhe, dopovnene. Proiekt «Pidtrymka nalezhnogo vriaduvannia v mistsevykh hromadakh yak skladovoi reformy detsentralizatsii» Koordynatora proektiv OBSle v Ukraini. Kyiv, Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy, Tovarystvo doslidnykiv Ukrainy. 2021. 441 s.
32. Kondratiev S.A., Kazmina M.V., Shmakova M.V., Markova E.G. Metod rascheta biogennoi nagruzki na vodnie obekti [The method of calculating biogenic load on water objects]. *Regionalnaya ekologiya*. 2011. 3-4. S. 50–59.
33. Kondratiev S.A., Shmakova M.V., Ulychev V.I. Determinirovano-stokhasticheskoe modelirovanie stoka i biogennoi nagruzki na vodnie obekti (na primere Finskogo zaliva Baltijskogo morya) [Deterministic-stochastic modeling of runoff and biogenic load on water bodies (on the example of the Gulf of Finland of the Baltic Sea)]. SPb.: Nestor-Istoriya. 2013. 36 s.
34. Luzovitska Yu.A., Koshkina O.V., Osadcha N.M. Vplyv vodnoho stoku na formuvannia vynosu biohennykh elementiv u baseini richky Desny [Influence of water runoff on the formation of nutrient removal in the Desna river basin]. *Hidrolohiiia, hidrokhemiiia i hidroekolohiiia*. 2014. 2(33). S. 37–45.
35. Medinets S.V., Medinets V.I., Mokliachuk L.I., Utkina K.B., Hovard K., Satton M.A. Stvorennia systemy otsinky azotnoho navantazhennia u baseini Dnistra [Create a system for assessing nitrogen load in the Dniester basin]. *Visnyk KhNU im. V. N. Karazina. Seriiia «Ekolohiiia»*. 2017. 16. S. 123–131.
36. Osadcha N.M., Osadchy V.I., Ukhan O.O., Klebanov D.O., Luzovitska Yu.A., Biletska S.V. Antropohenne navantazhennia biohennykh elementami na poverkhnevi vody baseyniv nyzhn'oho Dunayu, Dnistra ta Prutu [Anthropogenic load of nutrients on the surface waters of the lower Danube, Dniester and Prut basins]. *Hidrolohiya, hidrokhemiiia i hidroekolohiiia*. 2019. 3. S. 77–78.
37. Osadcha N.M., Osiysky E.Y., Skobley M.P., Ukhan O.O., Yaroshevych O.Y. Analiz osnovnykh antropohennykh navantazhen ta yikhnykh vplyviv u rayoni richkovoho baseynu Siverskoho Dintsya [Analysis of the main anthropogenic loads and their impacts of the Seversky Donets river basin]. 2018. 68 s.
38. Osadcha N.M., Ukhan O.O., Chekhniy V.M., Holubtsov O.H. Otsinka emisiyi biohennykh elementiv ta orhanichnykh rečovyn u poverkhnevi vody baseynu r. Siversky Donets vid dyfuznykh dzherel [Estimation of emission of nutrients and organic substances in surface waters of the Seversky Donets basin from diffuse sources] *Problemy hidrolohiyi, hidrokhemiiyi, hidroekolohiiyi*. Monohrafiya. K.: Nika-tsentr. 2019. S. 192–200.
39. Osadchy V.I., Osadcha N.M., Mostova N.M. Vplyv urbanizovanykh terytoriy na formuvannia himichnoho skladu poverkhnevnykh vod baseynu Dnipra [Influence of urbanized territories on the formation of the chemical composition of surface waters of the Dnieper basin]. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*. 2002. 250. S. 242–261.
40. Osypov V.V., Bonchkovsky A.S., Oreshchenko A.V., Oshurok D.O., Osadcha N.M. Obchyslennia kilkosty opadiv na ukraïnskykh meteostantsiiakh iz vrakhuvanniam vplyvu vitru [Calculating

the amount of precipitation at Ukrainian weather stations taking into account the influence of wind]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina, serii «Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia»*. 2021. 55. S. 204–215. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-15>

41. *Pitsil A.O.* Otsinka zabrudnennia poverkhnevoho stoku ta yoho vplyv na yakist vodnykh dzherel na miskykh landshaftakh [Assessment of surface runoff pollution and its impact on the quality of water sources in urban landscapes]. *Visnyk ZhNAEU*. 2012. 1(1). S. 391–401.

42. Portal elektronnykh posluh Derzhavnogo ahentstva vodnykh resursiv Ukrainy [Portal of Electronic Services of the State Agency of Water Resources of Ukraine]. URL: <https://e-services.davr.gov.ua/>

43. *Solomatina V.D., Pinkina T.V., Svitelskyi M.M., Matkovska S.I., Ishchuk O.V., Fediuchka M.M.* Vzaiemozviazok fosforno-kaltsiievoho rezhymu vodoim z yikhnoiu bioproduktyvnistiu (ohliad) [Interconnection of phosphate-calcium regime of reservoirs with their bioproductivity (review)]. *Visnyk NUVHP. Serii «Silskohospodarski nauky»*. 2019. 1(85). S. 105–123.

44. *Starodubtsev V.M., Fesenko N.V., Vlasenko I.S., Serhiienko A.Iu.* Aktualni ekolohichni protsesy v Sulynskii zatotsi Kremenchutskoho vodoskhovyshcha [Current ecological processes in the Sulynska Bay of the Kremenchuk Reservoir]. *Naukovi dopovidi Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy*. 2013. 2(38).

45. *Tekhnichnyy zvit EUWI+EAU-UA-14 «Rozroblennya planu upravlinnya baseynu Dnipra v mezhakh Ukrayiny: faza 1, krok 2 - Analiz antropohennoho navantazhennya ta yoho vplyvu, otsinka ryzyku, ekolohichni tsili dlya masyviv poverkhnevnykh vod»* [Development of the Dnipro Basin Management Plan within Ukraine: Phase 1, Step 2 - Analysis of Anthropogenic Load and Its Impact, Risk Assessment, Environmental Objectives for Surface Water Bodies]. 2020. 132 s.

46. *Ukhan O.O., Osadcha N.M.* Otsinka antropohennoho navantazhennia biohennymy elementamy ta orhanichnymy rehovynamy u baseini r. Teteriv [Assessment of anthropogenic impact on the Teteriv River by nutrients and organic substances]. *Hidrolohiya, hidrokimiya i hidroekolohiia*. 2021. 1(59). S. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.6>

47. *Khilchevskyi V.K.* Rol ahrokhimichnykh zasobiv u formuvanni yakosti vod baseinu Dnipra [The role of agrochemicals in shaping the water quality of the Dnipro basin]. K.: VPTs «Kyivskiy universytet». 1996. 222 s.

48. *Khrisanov N.I., Osipov G.K.* Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov [Management of eutrophication of reservoirs]. SPb.: Gidrometizdat. 1993. 278 s.

49. Tsentralna heofizychna observatoriia imeni Borysa Sreznevskoho (TsHO) [Central Geophysical Observatory named by Boris Sreznevsky (CGO)]. URL: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/>

Assessment of nutrients load in the Sula river basin from point and diffuse sources

Bonchkovskiy A.S., Osypov V.V.

Excessive supply of nutrients, phosphorous and nitrogen, to water bodies leads to their eutrophication and other adverse natural processes in aquatic ecosystems. The Sulynska Bay, where the Sula River discharges, has been suffering from severe eutrophication and fish mortality. This is probably due to the high nutrient load in the Sula River basin. However, the dominant approach in Ukraine, which took into account only point sources, did not allow estimating the actual volumes of nutrient inputs to water bodies. A calculation method has been applied in the article for determining the nutrient load of the Sula basin, which takes into account the inputs from point and diffuse sources of pollution. The method applied enabled to establish that the emission in the Sula basin is 921 tons per year or 0.05 tons per km² for nitrogen and 313 tons per year or 0.017 tons per km² for phosphorous. However, due to natural processes (primarily nitrification-denitrification and sedimentation), some nutrients are retained in the basin and do not enter water bodies. Thus, it was calculated that 273 tons per year nitrogen and 135 tons per year phosphorous enter the Sula directly. The main nutrient sources are not point sources of pollution, but rather inputs from arable lands (96 tons per year for nitrogen and 95 tons per year for phosphorous) and from the population unconnected to sewage systems (68 tons per year for nitrogen). However, for phosphorous, point sources due to inefficient wastewater treatment facilities also contribute significantly to the nutrient load – 18 tons per year. The study emphasizes the need for an integrated approach to water resources management, which should at least include calculations of the load of catchment with nutrients from diffuse sources of pollution.

Key works: anthropogenic load, emission, point sources, diffuse sources, nutrients, nitrogen, phosphorus, Sula River basin.

Надійшла до редакції 01.02.2024