

Ю.П. Ільїн

ypilyin@gmail.com

Український гідрометеоро-
логічний інститут
ДСНС України
та НАН України, Київ

УДК 551.468.6+556.545

СЕРЕДНІ БАГАТОРІЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА МІНЛИВІСТЬ ПОТОКІВ ВОДИ, СОЛІ ТА РОЗЧИНЕНИХ БІОГЕННИХ РЕЧОВИН В СИСТЕМІ ДНІПРОВСЬКО-БУЗЬКОГО ЛИМАНУ

Метою роботи є отримання оцінок середніх багаторічних величин, а також мінливості показників транспортування й обміну води, солі та поживних речовин у найбільшій естуарній системі Чорного моря — Дніпровсько-Бузькому лимані (ДБЛ). Використано дані моніторингових спостережень 1992–2018 років. Побудовано резервуарну модель транспорту води і речовин, що складається з двох з'єднаних одношарових боксів. Встановлено, що величини виносу поживних речовин з ДБЛ у море становлять 89,3% DIP і 41,4% DIN по відношенню до загального обсягу притоку цих речовин у ДБЛ з річковим стоком. В цілому у ДБЛ первинна продукція переважає респірацію, а денітрифікація значно переважає фіксацію азоту. За даними оцінок невизначеності методом Монте-Карло більшість змінних бокс-моделі ДБЛ може варіювати у середньому в межах лише 19–25% від їхніх середніх величин, незважаючи на велику мінливість вхідних потоків біогенних речовин річкового стоку.

Ключові слова: солоність, біогенні речовини, перехідні води, потоки води й речовини, резервуарна модель, бокс-модель, метод Монте-Карло

ВСТУП

Річкове надходження розчинених біогенних речовин (БР) на шельф Чорного моря відіграє основну роль у евтрофікації морських вод. Між прісною водою великих річок і солоною водою відкритого моря внаслідок їхньої взаємодії та змішування утворюються перехідні (транзитні) води естуарних систем, найбільшими з яких є дельта Дунаю та великі відкриті лимани — Дністровський та Дніпровсько-Бузький. Відкриті лимани можуть бути як споживачами так і виробниками (джерелами) БР (фосфору та азоту), а також первинної продукції для прилеглих морських акваторій. Отже, стають актуальними питання посилення наукових досліджень відкритих лиманів Чорного моря як об'єктів формування та транзиту перехідних вод, з метою вдосконалення системи моніторингу та інтерпретації отриманих даних.

Діючий порядок здійснення державного моніторингу вод [10] відносить екологічний моніторинг перехідних вод до сфери відповідальності Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), а саме — мережі гідрометеорологічних обсерваторій, станцій і постів. Найбільшим об'єктом такого моніторингу є Дніпровсько-Бузька гирлова область (ДБГО), яка включає гирло р. Південний Буг, Бузький

лиман (БЛ), дельту р. Дніпро, Дніпровський лиман (ДЛ) та прилеглий район відкритого моря. Систематичні гідролого-гідрохімічні дослідження ДБГО виконуються експедиційними суднами, береговими станціями і постами Миколаївського центру з гідрометеорології ДСНС України.

Метою даної роботи є отримання оцінок середніх багаторічних величин, а також мінливості показників транспорту й обміну води, солі та поживних речовин у найбільшій естуарній системі Чорного моря — Дніпровсько-Бузькому лимані (ДБЛ). Для цього застосовано широко відомий підхід і програмне забезпечення біогеохімічного моделювання міжнародного проєкту Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone (LOICZ) [15, 20]. В основу роботи покладено дані моніторингу ДБГО, накопичені за 1992–2018 роки.

Стан вивченості. Всебічну інформацію про гідрологічний режим Дніпровсько-Бузького лиману наведено в ґрунтовній монографії [11]. Питання мінливості окремих показників гідрологічних та гідрохімічних умов системи лиманів та гирл річок, що до них втікають, а також водообміну з прилеглим морем розглянуто, зокрема, в працях [3, 5–8]. Приклади чисельного моделювання процесів переносу води й речовин у системі ріка–лиман–море наве-

дено в публікаціях [1, 2, 12, 22]. Першу спробу коректної оцінки середніх багаторічних потоків води, солі та БР для ДБЛ у рамках підходу біогеохімічного моделювання LOICZ представлено в роботі [16]. Її продовженням є дана стаття, де більш докладно розглянуто застосування інтегральної моделі та ймовірнісної оцінки мінливості методом Монте-Карло (МК) щодо Дніпровсько-Бузького лиману.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Модель. Відповідно до методичного підходу, рекомендованого в [15] і застосованого для багатьох прибережних зон світу під час виконання та після закінчення міжнародного проєкту LOICZ (наприклад, [4, 16–18, 20, 21]), об'єкт дослідження представлено у вигляді одного або кількох резервуарів (боксів) довільної форми, обмежених та розділених природними кордонами — берегами лиманів і заток, різкими гідрологічними фронтами. Бокси можуть бути пов'язані між собою та з відкритим морем протоками. У випадку естуарної системи або пов'язаних між собою лиманів розташування боксів та послідовність розрахунків моделі визначаються географічними та гідрологічними умовами, тобто генеральними напрямками транспорту води й речовини між річками та прилеглим морем.

Для кожного боксу інтегровані по його об'єму диференційні рівняння балансу води, солоності та неконсервативної речовини можуть бути записані у наступному вигляді:

$$dV/dt = V_q + V_p - V_e - V_r; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d(SV)/dt &= S(dV/dt) + V(dS/dt) = \\ &= V_q S_q - V_r S_r + V_x(S_r - S); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} d(CV)/dt &= C(dV/dt) + V(dC/dt) = \\ &= V_q C_q - V_r C_r + V_x(C - C_r) + \Delta C, \end{aligned} \quad (3)$$

де V — об'єм резервуару; V_q, V_p, V_e, V_r — об'ємні потоки води, що надходить з річковим стоком, атмосферними опадами, витрачається з випаровуванням та через протоку у сусідній резервуар або відкрите море, відповідно (усі ці потоки можуть бути оцінені за даними вимірювань); V_x — об'ємний потік перемішування, необхідний для замкнення рівнянь балансу пасивної домішки як консервативної (солоності), так і неконсервативної (біогенних речовин); він знаходиться з рівняння (2) за даними про потоки води (1) і солоності у системі; S, S_q, S_r — середня по об'єму солоність води в боксі, гирлі ріки та у протоці відповідно; C, C_q, C_r — концентрації БР в боксі, гирлі ріки і у протоці; ΔC — неконсервативний потік речовини, що визначається біогеохімічними взаємодіями у воді резервуару; він має сенс різниці між сумою усіх внутрішніх джерел і сумою усіх внут-

рішніх стоків речовини (тобто тих, які не пов'язані з гідрологічними потоками у системі). Він знаходиться з рівняння (3), записаного окремо для кожної БР, що розглядається.

Час оновлення води у резервуарі розраховується за формулою [15, 20]:

$$T_r = V / (|V_r| + |V_x|). \quad (4)$$

У даній роботі балансова модель складається з двох резервуарів (боксів) — Дніпровського і Бузького лиманів, поєднаних між собою Сакенською протокою. До Бузького лиману надходять води р. Південний Буг, а до Дніпровського — р. Дніпро. Дніпровський лиман поєднується з Чорним морем через Кінбурнську протоку. Лимани вважаються добре перемішаними, тому бокси в моделі прийняті однорідними по глибині.

У даній двох-резервуарній моделі величини солоності і БР та їхні різниці у протоках задаються формулами:

$$C_r(1) = [C(1) + C(2)] / 2; C_r(2) = [C(2) + C_{ocn}] / 2; \quad (5)$$

$$C_x(1) = [C(2) - C(1)]; C_x(2) = [C_{ocn} - C(2)], \quad (6)$$

де $C_r(1), C_r(2)$ — концентрації трасера (солоності або БР) на межі Бузького і Дніпровського лиманів та у Кінбурнській протоці відповідно; $C(1), C(2), C_{ocn}$ — середні величини концентрації для Бузького, Дніпровського лиманів та прилеглому району Чорного моря відповідно; $C_x(1)$ та $C_x(2)$ — різниці концентрацій трасера між ДЛ та БЛ, морем та ДЛ відповідно.

Як встановлено розрахунками для бокс-моделі Дністровського лиману [19], на масштабах сезонної та міжрічної мінливості потоки опадів та випаровування на поверхню лиману на кілька порядків менші, ніж річковий стік та водообмін з морем, тому ними можна знехтувати. Оскільки Дністровський лиман розташований у близьких географічних та кліматичних умовах, цей висновок можна поширити і на водну систему ДБЛ. За рекомендацією [15], у бокс-моделі гирлових районів значних річок слід враховувати лише потоки, які не менше, ніж типова помилка визначення річкового стоку (~10%).

Серед потоків рівняння (1) не враховано надходження прісної води з підземним стоком. Оцінки [11] показали, що величина підземного стоку води в Дніпровсько-Бузький лиман на порядок менше, ніж річковий стік. Тому цим потоком також можна знехтувати, хоча у майбутньому він може бути легко врахований за наявності відповідних даних спостережень.

У рівняннях (1–3) V_r може бути задане за даними вимірювань течій у протоці або оцінене безпосередньо з рівняння (1) у наближенні його стаціонарності

(тобто, $dV/dt=0$), як це рекомендовано в [15, 20]. Умова стаціонарності балансової моделі виконується на масштабах мінливості від місяця до року, як доведено шляхом розрахунків для Дністровського лиману та подібних систем [4], тобто для оцінок середніх багаторічних потоків в системі ДБЛ рівняння (1–3) також можна вважати стаціонарними.

Таким чином, за даними про потоки прісної води до кожного боксу, середні величини солоності і БР у межах боксів, прилеглому районі моря та гирлах річок, по формулах (1–6) розраховуються потоки води та речовин між боксами та на виході з системи до моря, а також час оновлення води в кожному боксі та системі в цілому.

Слід зазначити, що, на відміну від детальних чисельних моделей на основі систем диференціальних рівнянь руху води, перенесення та еволюції речовин (наприклад, [1, 2, 12, 13, 22]), балансові моделі мають обмежені можливості застосування для завдань прогнозування, управління морськими об'єктами (зокрема лиманами) та гідротехнічного будівництва. Але вони значно простіші для аналізу інтегральних показників стану екосистеми, набагато дешевші у реалізації й дозволяють коректно організувати та інтерпретувати дані спостережень на кліматичних масштабах мінливості.

Дворезервуарна модель ДБЛ побудована і проаналізована за допомогою програми LOICZ Budget Toolbox [20], яка базується на MS Excel. Цей інструмент дозволяє користувачеві: (i) згенерувати відповідний робочий аркуш для введення даних, що описують прибережну систему; (ii) виконати автоматичне обчислення потоків та інших параметрів, що відповідають даним, уведеним відповідно до бюджетних конвенцій LOICZ; (iii) сформулювати зведені таблиці параметрів і потоків, що описують систему; (iv) генерувати і позначати діаграми конфігурації системи боксів, включаючи бюджети води, солоності та поживних речовин.

Оцінка мінливості потоків. Незважаючи на стаціонарність моделі (1–3), вона дає можливість аналізувати мінливість результатів у широкому діапазоні мінливості вхідних даних за допомогою оцінки невизначеності методом Монте-Карло.

Методи МК — це чисельні методи для проведення кількісного аналізу невизначеності шляхом генерації репрезентативної вибірки з функцій розподілу ймовірностей (ФРЙ) вхідних даних і параметрів математичної моделі та використання цієї вибірки для отримання відповідної вибірки результату моделі [14]. У припущенні незалежності між вхідними даними і параметрами моделі процедура передбачає випадковий вибір значень, по одному з кожної ФРЙ вхідних даних, які разом визначають сценарій,

що використовується в моделі для обчислення вихідного значення. Процедура повторюється для n реплікацій, що дають n вихідних значень, які характеризують невизначеність у результатах моделі при заданій структурі моделі й заданій невизначеності параметрів моделі.

Програмний комплекс LOICZ Budget Toolbox [20] передбачає можливість розгортання робочої таблиці бюджету для виконання стандартного аналізу невизначеності МК шляхом додання n стовпчиків реплікацій вхідних даних та результатів моделі. Користувач може: (i) вибрати набір вхідних параметрів моделі; (ii) самостійно призначити вид ФРЙ кожному з параметрів; (iii) повторити моделювання для кожної з n реалізацій набору параметрів; (iv) обчислити середні величини (СВ) й середньо-квадратичні відхилення (СКВ) змінних моделі по усій сукупності з n реалізацій набору параметрів. Призначити вид ФРЙ можна після аналізу гістограм розподілів вхідних даних, вибравши для кожної змінної функцію з набору: нормальний розподіл; логнормальний розподіл; усічений нормальний розподіл; експоненціальний розподіл; гамма-розподіл; рівномірний розподіл. Параметри більшості з перерахованих функцій визначаються попередніми вибірковими оцінками СВ та СКВ вхідних змінних, а рівномірний розподіл задається їхніми мінімальною й максимальною величинами. Максимально можлива кількість реплікацій у процедурі МК $n=249$ через обмеження EXCEL.

Дані спостережень. Результати гідрологічних і гідрохімічних спостережень у Дніпровсько-Бузькій гирлової області 1992–2018 рр. дозволяють оцінити потоки води і біогенних речовин, необхідні для побудови балансової моделі (бокс-моделі). Величини середнього багаторічного річкового стоку розраховано за даними спостережень на замикаючих створах річок П. Буг (Олександрівка) та Дніпро (Каховська ГЕС). Середні по боксах, гирлах річок та прилеглому морю величини солоності та концентрації біогенних речовин розраховувалися за даними станцій моніторингу, розташування яких показано на *рис. 1*. Проби води на солоність та БР відбиралися з поверхневого, придонного та подекуди проміжного горизонтів.

Відповідно до прийнятої термінології LOICZ, загальний (розчинений) фосфор TDP — це сума розчиненого неорганічного фосфору (фосфатів) і розчиненого органічного фосфору: $TDP = DIP + DOP$; загальний (розчинений) азот — це сума розчиненого неорганічного азоту (амонійного + нітратного + нітритного) і розчиненого органічного азоту: $TDN = DIN + DON$. У даному аналізі в рамках бокс-моделі розглядаються концентрації та потоки DIP та DIN за даними гідрохімічних вимірювань. У даній

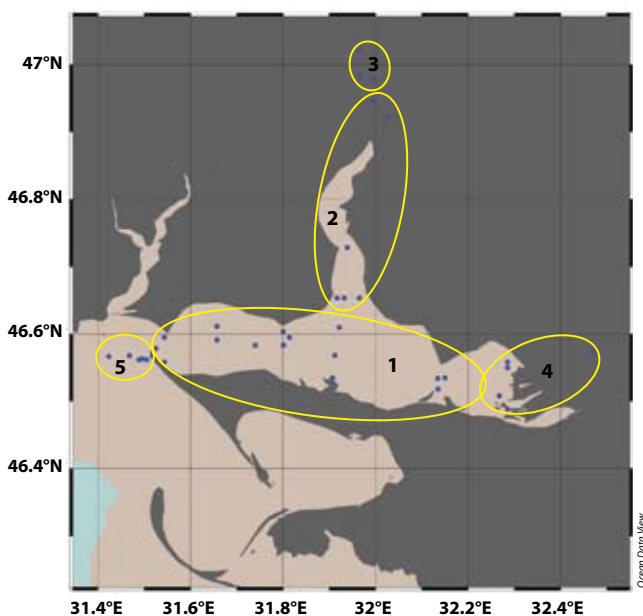


Рис. 1. Розташування океанографічних станцій, за даними яких оцінено середні величини солоності та БР для Дніпровського лиману (1), Бузького лиману (2), гирла р. Південний Буг (3), дельти р. Дніпро (4) та прилеглому району Чорного моря (5)

роботі використовуються також позначення P для розчиненого неорганічного фосфору (фосфатів) та N для розчиненого неорганічного азоту.

Для розрахунку середніх величин солоності і БР, а також СКВ по заданих межах боксів (лиманив), гирл вхідних річок і району прилеглому моря (рис. 1) використовувалася опція "Усереднення по боксах" програмного комплексу Ocean Data View [19]. При розрахунках відбраковано дані, якщо їхнє відхилення від СВ перевищували 3 СКВ. Кількість відібраних та відбракованих даних для боксів, річкових гирл та прилеглому моря, а також середня глибина відбору проб наведені в табл. 1. Загальна кількість проаналізованих проб по кожному з трасерів становить 3639 за 27 років спостережень.

Недостатня кількість експедиційних спостережень у холодний період року дозволила отримати середні багаторічні величини лише для "теплих"

місяців (з квітня по жовтень включно), а також для усього теплого сезону. Останні використані для аналізу в даній роботі, проте результати бокс-моделі перераховані для повного року. Графіки внутрішньорічних змін величин стоку річок, а також солоності та вмісту біогенних речовин в усіх складових моделі з квітня по жовтень наведено в [16]. Середній багаторічний стік води р. Дніпро є максимальним у травні (близько 5 км^3 на місяць), мінімальним у серпні (майже 2 км^3) і зростає до $3,2 \text{ км}^3$ у жовтні. Стік р. Південний Буг набагато менший і змінюється від $0,38 \text{ км}^3$ у квітні до $0,13 \text{ км}^3$ у серпні, далі — до $0,23 \text{ км}^3$ у жовтні. Вміст DIP у водах річок зростає з весни до осені, досягаючи $6,5 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$. Концентрація DIN максимальна у квітні в гирлі р. П. Буг ($41,5 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$), далі знижується до $12 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$ у липні і зростає до $23,4 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$ у жовтні. У дельті р. Дніпро середній місячний вміст DIN протягом весняно-літньо-осіннього сезонів коливається у межах $10,4\text{--}18,1 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$.

У табл. 2 представлені вхідні дані моделі — середні величини та середньоквадратичні відхилення для лиманів, річкових гирл та прилеглому моря.

Сумарні площа і об'єм ДБЛ прийняті рівними 928 км^2 та $4,1 \text{ км}^3$ відповідно [11]. Оцінка площ та об'ємів окремих складових системи, тобто ДЛ та БЛ, отримана шляхом інтегрування даних про рельєф ДБЛ, використаних в оперативній системі чисельного прогнозу морського хвилювання [9]. Через згладжувальну дію чисельної сітки сумарні модельні площі і об'єми ДБЛ вийшли меншими, ніж наведені вище. Але вважаючи вірними співвідношення (пропорцію) між модельними величинами, "реальні" площі та об'єми ДЛ та БЛ були оцінені на основі сумарних величин [11] як, відповідно, $764,7$ і $163,3 \text{ км}^2$ та $3,27$ і $0,83 \text{ км}^3$. При цьому середня глибина ДЛ становить $4,3 \text{ м}$, БЛ — $5,0 \text{ м}$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В результаті розрахунків за бокс-моделлю (1–6) отримані середні величини потоків води, солі та біогенних речовин за даними з табл. 2 про серед-

Таблиця 1. Кількість відібраних / відбракованих даних про солоність (S), біогенні речовини (P , N) та середня глибина відбору проб (h , m)

Номер на рис. 1	Назва району	S	P	N	h
1	Дніпровський лиман	1153 / 0	1101 / 52	1044 / 109	3,5
2	Бузький лиман	265 / 0	258 / 7	249 / 16	2,7
3	Гирло р. П. Буг	1545 / 19	1546 / 18	1495 / 69	2,0
4	Гирло р. Дніпро	345 / 146	466 / 25	479 / 19	2,2
5	Чорне море	166 / 0	158 / 8	165 / 1	5,3
	Загалом	3474 / 165	3529 / 110	3425 / 214	

Таблиця 2. Вхідні дані бокс-моделі Дніпровсько-Бузького лиману: СВ ± СКВ річкового стоку (V_q), солоності (S) та вмісту розчинених неорганічних фосфору і азоту

Район	$V_q, \text{км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$	$S, \text{‰}$	$P, \text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$	$N, \text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$
р. Південний Буг	$2,712 \pm 0,69$	$3,7 \pm 2,36$	$5,06 \pm 3,66$	$22,15 \pm 15,24$
р. Дніпро	$41,432 \pm 8,78$	$0,33 \pm 0,02$	$4,34 \pm 2,30$	$14,31 \pm 10,94$
Бузький лиман		$6,35 \pm 4,79$	$3,06 \pm 2,35$	$8,58 \pm 7,50$
Дніпровський лиман		$6,78 \pm 5,76$	$2,69 \pm 1,82$	$14,31 \pm 10,94$
Чорне море		$12,61 \pm 4,71$	$1,54 \pm 1,04$	$4,72 \pm 3,65$

ні багаторічні величини річкового стоку, солоності та концентрацій БР в системі Дніпровсько-Бузького лиману для сезону квітень–жовтень (рис. 2–4, табл. 3–5).

Середні багаторічні потоки води і солі. До системи за даними спостережень у середньому надходить близько 44 км^3 води річок Дніпро та Південний Буг. Стільки ж потрапляє у Чорне море, якщо знехтувати іншими складовими прісноводного бюджету (табл. 3).

Турбулентний потік води V_x , що відповідає за баланс речовини і оцінений з рівняння для консервативного трасеру (солоності), у перерахунку за рік складає $18,1 \text{ км}^3$ для БЛ та $69,3 \text{ км}^3$ для ДЛ. Хоча турбулентний обмін діє в обох напрямках (відповідні стрілки на рис. 2 мають два вістря), але потік турбулентного обміну направлений проти градієнту речовини, що переноситься, тобто з моря в систему у випадку солоності, але з системи у море для БР (у напрямку більшого за розміром вістря стрілки). Час оновлення води Дніпровського лиману майже на 6 діб коротший, ніж Бузького лиману, що пояснюється набагато більшим об'ємом стоку V_q

р. Дніпро, тобто його більшою здатністю до промивання лиману.

Середні багаторічні потоки біогенних речовин. На рис. 3, 4 наведено результати розрахунків складових бюджету розчинених неорганічних фосфору і азоту відповідно до обраної структури бокс-моделі ДБЛ. У таблицях 4, 5 ці результати представлені разом з двома додатковими стовпчиками, у яких подані відносні величини залишкового члена рівняння балансу та сумарного виносу розчиненої БР у море у порівнянні з найбільш значним членом — надходженням речовини з річковим стоком:

$$\text{Залишок} = \Delta C / V_q C_q; \quad (7)$$

$$\text{Виніс} = [V_r C_r + V_x (C - C_r)] / V_q C_q. \quad (8)$$

З табл. 4, 5 видно, що з Дніпровського лиману результуючим адвективним та турбулентним потоками виноситься у Чорне море $172,7 \text{ Ммоль}$ ($5348,6 \text{ тонн}$) неорганічного фосфору та $269,9 \text{ Ммоль}$ ($3780,4 \text{ тонн}$) неорганічного азоту на рік. Сумарне надходження цих речовин з річок П. Буг та Дніпро становить $193,5 \text{ Ммоль}$ (5992 тонни) та $652,8 \text{ Ммоль}$ (9143 тонни) на рік відповідно. Таким чином, від-

Таблиця 3. Середні величини солоності і складових балансу води і солі у системі Дніпровсько-Бузького лиману за даними спостережень і розрахунків бокс-моделі

Бокс	S_q	S	S_r	V_q	V_r	V_x	T_r
	‰			$\text{км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$			дні
БЛ	3,7	6,35	6,57	2,7	-2,7	18,1	14,6
ДЛ	0,33	6,78	9,70	41,4	-44,1	69,3	9,1

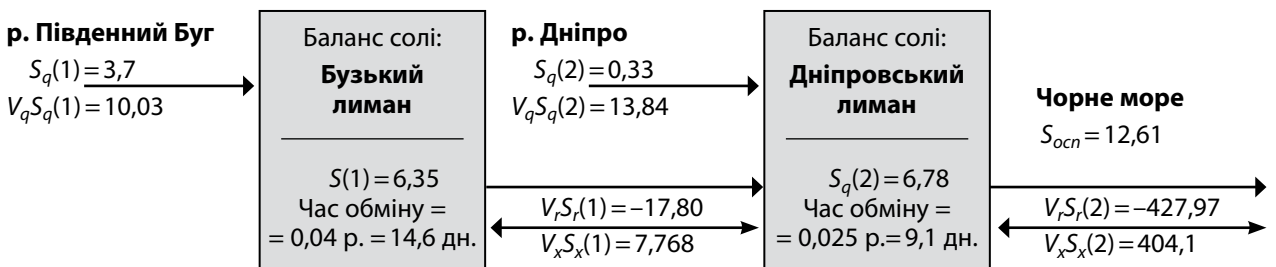


Рис. 2. Структура бокс-моделі Дніпровсько-Бузького лиману та результати оцінки середніх складових балансу води і солі. Одиниці вимірювання: площа — км^2 ; об'єм — км^3 ; глибина — м; потоки води — $\text{км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$; солоність — ‰; потоки солі — $10^3 \text{ тон} \cdot \text{рік}^{-1}$; час обміну — рік, день

носний виніс БР з ДБЛ у море складає 89,3% DIP та 41,4% DIN. У табл. 4, 5 величини виносу та залишків БР для кожного боксу розраховані за формулами (7–8) відносно надходження з ріки, що впадає в цей лиман (а не до сумарного річкового внеску), тому відносна величина залишку може перевищувати 100%.

Інтерпретація неконсервативних (залишкових) складових балансу БР (Δ_{DIP} , Δ_{DIN}) може бути зроблена за допомогою стехіометричного аналізу LOICZ [15, 20].

Розчинений неорганічний фосфор.

Бузький лиман. З табл. 4 видно, що близько 0,67 Ммоль/рік (20,7 тонн) DIP акумулюється у лимані в середньому за теплий період року (IV–X), беручи участь у сумарному метаболізмі екосистеми (СМЕ). Додатня величина залишкового члена означає, що екосистема є виробником неорганічного фосфору і споживачем органічної речовини. Величина СМЕ апроксимується різницею між первинною продукцією і респірацією ($p-r$). Зі співвідношення Редфілда між вуглецем і фосфором (C:P)=(106:1) ця різниця може бути оцінена величиною СМЕ=($p-r$)=-70,7 Ммоль вуглецю за рік. Таким чином, впродовж теплого періоду року респірація переважає первинну продукцію органічної речовини.

Дніпровський лиман. Залишковий член рівняння балансу DIP дорівнює -21,4 Ммоль/рік (664,1 тони). Від’ємна величина залишкового члена означає, що екосистема є виробником органічної речовини і споживачем неорганічного фосфору (табл. 4). Зі співвідношення Редфілда між вуглецем і фосфором (C:P)=(106:1) величина СМЕ=($p-r$)

= 2272,6 Ммоль вуглецю за рік. Таким чином, впродовж теплого періоду року первинна продукція органічної речовини набагато більша, ніж респірація.

Розчинений неорганічний азот.

Бузький лиман. 16,3 Ммоль/рік (228 тонн) DIN акумулюється у лимані в середньому за теплий період року IV–X, неконсервативний залишок додатний (табл. 5). Величина метаболізму азоту в екосистемі, яка є різницею між фіксацією азоту і денітрифікацією ($N_{fix}-Denit$), може бути оцінена як різниця між спостереженим і теоретичним значеннями Δ_{DIN} . Останнє знаходиться по формулі $\Delta_{DINexp} = \Delta_{DIP}(N:P)$, де (N:P)=(16:1) — співвідношення Редфілда між азотом і фосфором. Таким чином, отримуємо: $\Delta_{DINexp} = 10,7$ Ммоль/рік; ($N_{fix}-Denit$) = 5,6 Ммоль/рік. Це означає, що у середньому за теплий період року процес фіксації азоту превалував над процесом денітрифікації.

Дніпровський лиман. Близько 399,1 Ммоль/рік (5591 тонн) DIN лиман втрачає у середньому за теплий період року IV–X (неконсервативний залишок від’ємний). Через співвідношення Редфілда отримуємо: $\Delta_{DINexp} = -343,0$ Ммоль/рік; ($N_{fix}-Denit$) = -56,1 Ммоль/рік. Це означає, що у середньому за теплий період року процес денітрифікації превалував над процесом фіксації азоту.

Дніпровсько-Бузький лиман у цілому втрачає 20,8 Ммоль (643 тони) DIP за рік у внутрішніх біохімічних процесах. Сумарний метаболізм екосистеми ($p-r$)=2201,9 Ммоль вуглецю за рік, тобто протягом теплого сезону первинна продукція переважає респірацію. Залишковий член балансу розчинено-

Таблиця 4. **Складові бюджету розчиненого неорганічного фосфору (DIP) у воді Дніпровсько-Бузького лиману за даними спостережень 1992–2018 років (квітень–жовтень)**

Бокс	P_x	$V_q P_q$	$V_r P_r$	$V_x P_x$	Δ_{DIP}	Залишок	Виніс
	ммоль/м ³	103 моль на рік					
БЛ	-0,37	13720	-7788	-6600	667	4,9	104,1
ДЛ	-1,15	179732	-93409	-79271	-21439	11,9	96,1

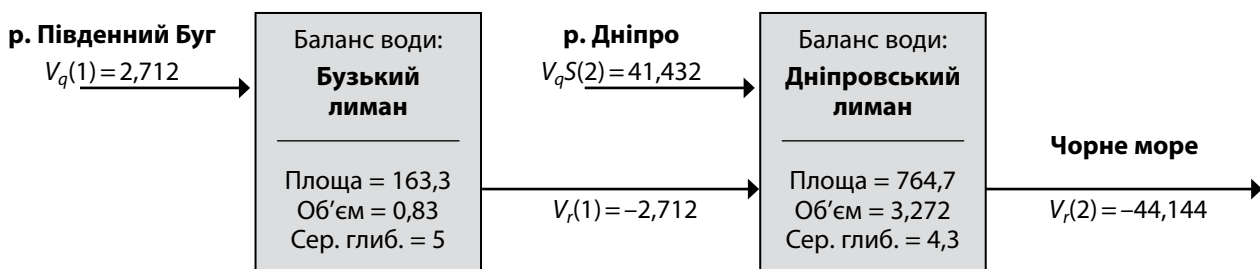


Рис. 2. Структура бокс-моделі Дніпровсько-Бузького лиману та результати оцінки середніх складових балансу води і солі. Одиниці вимірювання: площа — км²; об’єм — км³; глибина — м; потоки води — км³·рік⁻¹; солоність — ‰; потоки солі — 10³ тон·рік⁻¹; час обміну — рік, день

Таблиця 5. **Складові бюджету розчиненого неорганічного азоту (DIN) у воді Дніпровсько-Бузького лиману за даними спостережень 1992–2018 років (квітень–жовтень)**

Бокс	N_x	$V_q N_q$	$V_r N_r$	$V_x N_x$	Δ_{DIN}	Залишок	Виніс
	ммоль/м ³	10 ³ моль на рік					
БЛ	-3,19	60071	-18952	-57399	16280	27,1	127,1
ДЛ	-0,67	592684	-223128	-46764	-399143	67,4	45,5

го неорганічного азоту у системі ДБЛ є від’ємним: -382,9 Ммоль (5363 тонни) DIN на рік. Теоретична величина із співвідношення Редфілда становить -332,4 Ммоль (4655 тонн) DIN. Різниця між ними -50,5 Ммоль, тобто денітрифікація значно переважає фіксацію азоту.

Мінливість потоків за методом Монте-Карло.

Наведені у попередніх підрозділах середні багаторічні оцінки складових бюджету води, солі та БР є параметрами побудованої бокс моделі ДБЛ. Ця модель може слугувати для оцінки потоків в рамках конкретних сценаріїв, наприклад, коли задаються інші вхідні величини стоку річок та концентрації БР в річкових водах. У даній роботі поставлене завдання: оцінити мінливість розрахункових величин складових бюджетів води, солі і БР за умов варіації головних джерел — водного стоку річок Дніпра та

Південного Бугу й концентрацій в річкових водах розчинених БР, відповідно до їхніх функцій розподілу ймовірностей. Аналіз гістограм повторюваності даних спостережень показав, що ФРЙ стоку річок відповідає нормальному (Гаусову) закону, а повторюваності концентрацій розчинених фосфору і азоту найкраще апроксимуються Гамма-розподілом. Подальші розрахунки виконано за допомогою метода Монте-Карло, описаного у попередньому розділі.

У якості початкових даних використано СВ та СКВ стоку П. Бугу, Дніпра та концентрацій БР в гирлах річок з табл. 2. Усі інші дані залишаються незмінними, тобто заданими лише своїми СВ. Випадковим чином з розподілів імовірності, заданих відповідно до СВ та СКВ вхідних даних знаходяться комбінації їхніх конкретних значень і виконуються розрахунки за формулами (1–6). Кількість репліка-

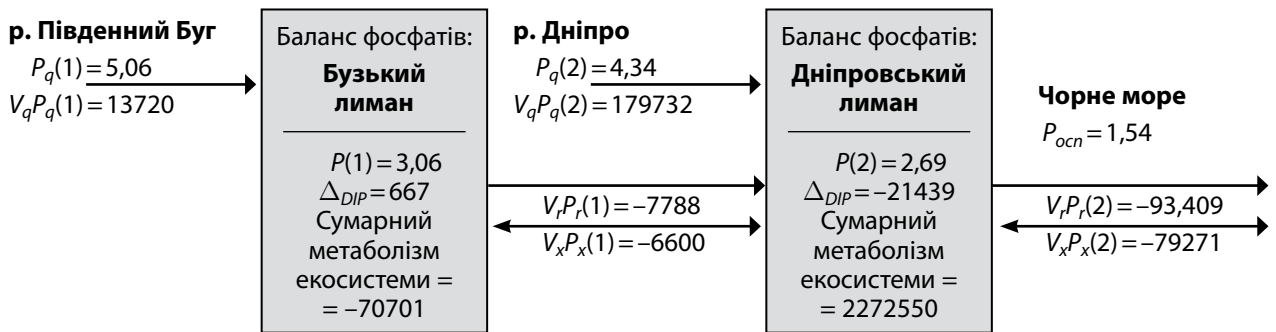


Рис. 3. Середні складові бюджету розчиненого неорганічного фосфору (фосфатів) в системі Дніпровсько-Бузького лиману за даними спостережень і розрахунків бокс-моделі. Одиниці вимірювання: концентрація БР — ммоль·м⁻³; потік БР — 10³ моль·рік⁻¹; СМЕ — 10³ моль С рік⁻¹

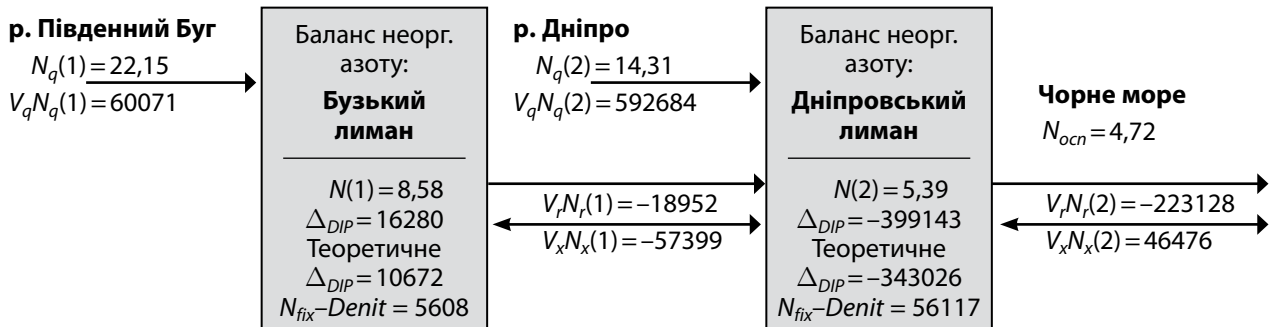


Рис. 4. Середні складові бюджету розчиненого неорганічного азоту (амонійного + нітратного + нітритного) в системі Дніпровсько-Бузького лиману за даними спостережень і розрахунків бокс-моделі. Одиниці вимірювання: концентрація БР — ммоль·м⁻³; потік БР — 10³ моль·рік⁻¹

Таблиця 6. Середні річні величини, середньоквадратичні відхилення та коефіцієнти варіації потоків води, солі і БР в бокс-моделі Дніпровсько-Бузького лиману за методом Монте-Карло. Одиниці виміру потоків: води — км³, солі — 10³ тонн, БР — 10³ моль на рік

Назва величини	Позначення	СВ	СКВ	К, %
Стік р. Південний Буг	$V_q(1)$	2,663	0,671	25
Стік р. Дніпро	$V_q(2)$	41,709	8,723	20
Потік води через Сакенську протоку	$V_r(1)$	-2,663	0,671	25
Потік води через Кінбурнську протоку	$V_r(2)$	-44,372	8,734	20
Потік солі з р. Південний Буг	$V_q S_q(1)$	9,848	2,482	25
Потік солі з р. Дніпро	$V_q S_q(2)$	13,930	2,914	21
Адвективний потік солі через Сакенську пр.	$V_r S_r(1)$	-17,475	4,404	25
Турбулентний потік солі через Сакенську пр.	$V_x S_x(1)$	7,627	1,922	25
Адвективний потік солі через Кінбурнську пр.	$V_r S_r(2)$	-430,178	84,672	20
Турбулентний потік солі через Кінбурнську пр.	$V_x S_x(2)$	406,399	81,664	20
Потік DIP з р. Південний Буг	$V_q P_q(1)$	13145	9448	72
Потік DIP з р. Дніпро	$V_q P_q(2)$	178907	104303	58
Адвективний потік DIP через Сакенську пр.	$V_r P_r(1)$	-7646	1927	25
Турбулентний потік DIP через Сакенську пр.	$V_x P_x(1)$	-6480	1633	25
Адвективний потік DIP через Кінбурнську пр.	$V_r P_r(2)$	-93891	18481	20
Турбулентний потік DIP через Кінбурнську пр.	$V_x P_x(2)$	-79722	16020	20
Потік DIN з р. Південний Буг	$V_q N_q(1)$	54869	37000	67
Потік DIN з р. Дніпро	$V_q N_q(2)$	623697	530441	85
Адвективний потік DIN через Сакенську пр.	$V_r N_r(1)$	-18607	4689	25
Турбулентний потік DIN через Сакенську пр.	$V_x N_x(1)$	-56356	14203	25
Адвективний потік DIN через Кінбурнську пр.	$V_r N_r(2)$	-224281	44145	19
Турбулентний потік DIN через Кінбурнську пр.	$V_x N_x(2)$	-47030	9450	20

цій задана максимально можливою $n = 249$. За цією сукупністю вхідних даних та результатів розрахунків отримані МК-оцінки СВ та СКВ, які відповідають заданим ФРІ та структурі й параметрам бокс-моделі ДБЛ.

Результати ймовірнісного моделювання за методом МК представлені в табл. 6. Як наочна характеристика мінливості використовувався коефіцієнт варіації $K = 100 \text{ СКВ} / \text{СВ} (\%)$.

Перш за все слід зазначити, що за оцінками методом МК середні величини та СКВ вхідних даних щодо стоку річок і потоків солі та БР з них (табл. 6) близькі до таких, оцінених за даними спостережень (табл. 2). Це свідчить про правильний вибір виду розподілу ймовірностей вхідних даних і, отже, додає довіру до результатів моделювання інших потоків з використанням методу Монте-Карло.

З табл. 6 також можна зробити висновок, що більшість змінних бокс-моделі може варіювати у середньому в межах лише 19–25% від їхніх СВ, незважаючи на велику мінливість вхідних потоків біогенних речовин річкового стоку (значення K виділені напівжирним шрифтом). Це доводить сутність напівзамкненої естуарної системи ДБЛ як буферної (демпферної) зони у перенесенні розчинених ре-

човин з річок у відкрите море, принаймні в рамках підходу балансового моделювання.

ВИСНОВКИ

1. Побудовано резервуарну (балансову) модель Дніпровсько-Бузької системи лиманів та річкових гирл за даними регулярних спостережень упродовж 1992–2018 років (з квітня по жовтень). Модель складається з двох пов'язаних одношарових (повністю перемішаних) боксів, у кожному боксі вхід з річки, вихід з першого боксу — до другого, а з другого боксу — у прилегле море. Рівняння балансу води та речовин прийняті стаціонарними, а потоками атмосферних опадів, випаровування та підземних вод знехтувано у порівнянні з річковим стоком на масштабах міжрічної мінливості. У рамках побудованої моделі розраховано потоки води, солей та біогенних речовин (розчиненого неорганічного фосфору та азоту).

2. У Чорне море у середньому надходить близько 44 км³ води річок Дніпро та Південний Буг. Турбулентний потік води, який відповідає за баланс речовини, за оцінкою з рівняння для консервативного трасеру (солоності) складає 18,1 км³ для БЛ та 69,3 км³ для ДЛ. Загалом для системи ДБЛ турбу-

лентний потік складає 40,4 км³ на рік. Сумарне постачання біогенних речовин з ДБЛ у море становить 89,3% DIP та 41,4% DIN відносно загального обсягу надходження цих речовин до ДБЛ з річковим стоком.

3. За багаторічний період спостережень 1992–2018 років розраховано середній метаболізм БР для теплої частини року (квітень-жовтень). В екосистемі Бузького лиману респірація переважає первинну продукцію органічної речовини, а процес фіксації азоту превалює над процесом денітрифікації. У Дніпровському лимані навпаки, впродовж теплої періоду року первинна продукція органічної речовини набагато більша, ніж респірація, при тому процес денітрифікації превалює над процесом фіксації азоту. Загалом, у Дніпровсько-Бузькому лимані протягом середнього багаторічного теплої сезону первинна продукція переважає респірацію, а денітрифікація значно переважає фіксацію азоту.

4. Чисельні оцінки вхідних і вихідних потоків, а також метаболізму біогенних речовин у резервуарах моделі Дніпровсько-Бузької гирлової облас-

ті відповідають середньому багаторічному стану. Але, незважаючи на стаціонарність моделі, вона дає можливість аналізувати мінливість результатів у широкому діапазоні вхідних даних за допомогою оцінки невизначеності методом Монте-Карло.

5. За даними оцінок методом МК більшість змінних бокс-моделі ДБЛ може варіювати у середньому в межах 19–25% від їх середніх величин, незважаючи на велику мінливість вхідних потоків біогенних речовин річкового стоку. Це доводить сутність напівзамкненої естуарної системи ДБЛ як буферної (демпферної) зони у перенесенні розчинених речовин з річок у відкрите море, принаймні в рамках підходу балансового моделювання.

У даній роботі вперше отримано коректні оцінки складових балансів біогенних речовин в системі ДБЛ на основі багаторічних спостережень. Дані, що містяться в таблицях 2–6, можуть у подальшому служити базою для порівняння результатів і вдосконалення діючої системи моніторингу перехідних вод, що продукуються і постачаються в Чорне море гирловою областю Дніпра та Південного Бугу.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

- Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В., Фомин В.В., Черкесов Л.В. Моделирование распространения загрязняющих веществ в районах Одесского залива и Днепро-Бугского лимана / Системы контроля окружающей среды. Севастополь, 2005. 177–179. [Aleksseev D.V., Ivanov V.A., Ivancha E.V., Fomin V.V., Cherkesov L.V. (2005). Modeling of the pollutants spreading in the areas of the Odessa Bay and the Dnieper-Bug estuary / Environmental control systems. Sevastopol. 177–179] [In Russian].
- Бровченко І.О., Мадерич В.С., Терлецька К.В. Разномасштабное численное моделирование циркуляции в Черном море и Днепробугском лимане / Системы підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. Київ, 2015. 89–92. [Brovchenko I.O., Maderich V.S., Terletska K.V. (2015). Multi-scale numerical simulation of circulation in the Black Sea and the Dnieper estuary / Decision support systems. Theory and practice. Kyiv. 89–92] [In Russian].
- Губанов В.И., Моница Т.Л., Андриященко Б.Ф., Рябинин А.И., Сотникова А.Г., Шибеева С.А. Гидрохимические условия и состояние загрязнения вод Днепро-Бугского лимана / Исследования шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна. Севастополь, 1995. 55–64. [Gubanov V.I., Monina T.L., Andriushchenko B.F., Riabinin A.I., Sotnikova A.G., Shibaeva S.A. (1995). Hydrochemical conditions and state of pollution of the Dnieper-Bug liman / Investigations of the Azov-Black sea basin shelf zone. Sevastopol. 55–64] [In Russian].
- Ільїн Ю.П., Берлінський М.А. Балансова модель транспорту та метаболізму розчинених форм азоту і фосфору в системі Дністровського лиману. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2022. **29**. С.59–67. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.29.2022.05> [Ilyin Yu.P., Berlinsky M.A. (2022). Balance model of dissolved nitrogen and phosphorus transportation and metabolism in the Dniester estuary system. *Ukrainian hydrometeorological journal*. **29**. 59–67] [In Ukrainian]
- Ильин Ю.П., Симов В.Г., Хороліч Н.Г. Потоки водообмена в системе Днепро-Бугского лимана по данным измерений. Материалы научной конференции "Ломоносовские чтения" 2003 года. Севастополь, 2003. 24–25. [Ilyin Y.P., Simov V.G., Khorolich N.G. (2003). Water exchange flows in the Dnieper-Bug liman system by the measurements data. Materials of the scientific conference "Lomonosov Readings" in 2003. Sevastopol. 24–24] [In Russian].
- Ильин Ю.П., Клименко Н.П., Мезенцева И.В., Чайкина А.В. Комплексная оценка современного состояния загрязнения морской среды в прибрежных районах северо-западной части Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. **8**. Севастополь, 2003. С.236–241. [Ilyin Y.P., Klimentko N.P., Mezentseva I.V., Chaykina A.V. (2003). Comprehensive assessment of the current state of marine pollution in the coastal areas of the north-western part of the Black Sea. *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. **8**. Sevastopol. 236–241] [In Russian].
- Коржов Є.І. Антропогенний вплив на екосистему пониззя Дніпра та можливі шляхи його послаблення. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2015. **267**. 102–108. [Korzhev E.I. (2015). Anthropogenic impact on the ecosystem of the lower reaches of the Dnieper and possible ways to weaken it. *Scientific works of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute*. **267**. 102–108] [In Ukrainian].
- Коржов Є.І., Гончарова О.В. Формування режиму солоності вод Дніпровсько-Бузької гирлової області під впливом кліматичних змін у сучасний період. *Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions / Collective monography*. University of Life Sciences in Lublin. 2020. 315–330. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-45-7.18> [Korzhev E.I., Goncharova O.V. (2020). Formation of the salinity regime of the Dnieper-Bug estuary waters under the influence of climate change in the modern period. *Actual*

- problems of natural sciences: modern scientific discussions / Collective monography. University of Life Sciences in Lublin. 315–330] [In Ukrainian].
9. Осадчий В.І., Фомін В.В., Ільїн Ю.П., Будак І.В., Шпиг В.М. Оперативна система прогнозу морського хвилювання у прибережній смузі Азовського та Чорного морів / Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології. Київ, 2019. 116–121. [Osadchiy V.I., Fomin V.V., Ilyin Y.P., Budak I.V., Shpyg V.M. (2019). Operational system of marine waves forecasting for the Azov and Black Seas coastal zone / Problems of hydrology, hydrochemistry, hydroecology. Kyiv. 116–121] [In Ukrainian].
 10. Порядок здійснення державного моніторингу вод. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 19.09.2018 р. № 758. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Text> [Procedure for state water monitoring. Approved by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated September 19, 2018 № 758] [In Ukrainian].
 11. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья. Киев, 1990. 240 с. [Timchenko, V.M. (1990). Environmental and hydrologic studies of water ponds on the North-Western Black Sea shores. Kiev. 240 p.] [In Russian].
 12. Тучковенко Ю.С. Трехмерная математическая модель качества вод Днепровско-Бугского приустьевого района северо-западной части Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 12. Севастополь, 2005. 374–391. [Tuchkovenko Yu.S. (2005). Three-dimensional mathematical model of water quality of the Dnieper-Bug region of the north-western part of the Black Sea. *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. 12. Sevastopol. 374–391] [In Russian].
 13. Тучковенко Ю.С., Тучковенко О.А. Модель эвтрофикации морских и лиманных экосистем северо-западного Причерноморья. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. 21. 75–89. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08> [Tuchkovenko Yu.S., Tuchkovenko O.A. (2018). The model of eutrophication of marine and estuarine ecosystems in the Northwest Black Sea region. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 21. 75–89] [In Russian].
 14. Dakin M.E., Toll J.E., Small M.J., Brand K.P. (1996). Risk-Based Environmental Remediation: Bayesian Monte Carlo Analysis and the Expected Value of Sample Information. *Risk Analysis*. 16 (1). 67–79.
 15. Gordon D.C. Jr., Boudreau P.R., Mann K.H., Ong J.-E., Silvert W.L., Smith S.V., Wattayakorn G., Wulff F., Yanagi T. (1996). LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ/R&S/95–5, LOICZ, Texel, The Netherlands. VI+96 p.
 16. Ilyin Yu. (2021). Estimation of nutrients transport and metabolism in the Dnipro-Bug estuarine system based on data of the EMODnet Chemistry project. EMODnet Open Conference, Online, 14–16 June 2021. E-poster. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10747.44324>
 17. Ilyin Y.P., Lemesko E.M., Zervakis V. (2003). Water exchange in the Black and Aegean seas system based on the joint assessment of water and salt budgets. *Oceanography of Eastern Mediterranean and Black Sea. Similarities and Differences of Two Interconnected Basins*. Ankara. 105–111.
 18. Kiwango H., Njau K. N., Wolanski E. (2018). The application of nutrient budget models to determine the ecosystem health of the Wami Estuary, Tanzania. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 18 (2). 107–119. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2017.10.002
 19. Schlitzer R. (2018). Ocean Data View. <https://odw.awi.de>
 20. Swaney D.P., Giordani G. (2011). Proceedings of the LOICZ Workshop on biogeochemical budget methodology and applications, Providence, Rhode Island, November 9–10, 2007. LOICZ Research & Studies. No. 37. Helmholtz-Zentrum Geesthacht. 195 p.
 21. Xu H. et al. (2015). The fate of phosphorus in the Yangtze (Changjiang) Estuary, China, under multi-stressors: Hindsight and forecast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 163. 1–6. DOI: 10.1016/j.ecss.2015.05.032
 22. Yurkova I.Y., Ilyin Y.P. (2004). Simulation of the nutrient load to the Dnieper-Bug estuary, Ukraine. "30th Pacem in Maribus" Conference Proceedings. Kiev. 361–369.

Yu.P. Ilyin

Ukrainian Hydrometeorological Institute, Kyiv, Ukraine

AVERAGE LONG-TERM VALUES AND VARIABILITY OF WATER, SALT AND DISSOLVED NUTRIENT FLOWS IN THE SYSTEM OF THE DNIEPER-BUG ESTUARY

Riverine input of dissolved nutrients (phosphorus and nitrogen) to the NW Black Sea shelf plays the main part in the marine water eutrophication. Between the rivers' fresh water and open sea's saline water, transient estuarine systems may be partial consumer or producer of nutrients. To obtain mean multiannual estimates of nutrients transport and metabolism in the largest estuarine system of Dnipro and South Bug rivers (Dnipro-Bug liman, DBL), regular observational data of 1992–2018 were collected and widely known LOICZ biogeochemical modelling approach and software were applied. Box model of water and substances transport was constructed consisted of two connected one-layer boxes. Each box has the entrance from the river and exits: from the first box — to the second one, and

from the second box — to the adjacent sea. Using this model, the flows of water, salts and nutrients (dissolved inorganic phosphorus and nitrogen, DIP and DIN) were calculated. Non-conservative substance remnants, which are determined by internal biogeochemical (non-hydrographic) interactions were interpreted using Redfield's relations. Fluxes of groundwater, precipitations and evaporation were found to be neglectable comparing to riverine input and water exchange fluxes. It was established that the nutrients outputs from the DBL to the sea are: 89,3% of DIP and 41,4% of DIN in relation to the total volume of these substances' inflow to the DBL with river run-off. In general, in the DBL primary production outweighs the respiration, and denitrification significantly outweighs the nitrogen fixation. Numerical estimates of the DBL model correspond to the average long-term state. But it is available to analyze the response of the results on the input data variability by evaluating uncertainty using the Monte-Carlo (MK) method. According to MK-estimates, most variables of the DBL box model can vary on average in the range of only 19 — 25% of their mean values, despite the large variability of nutrient inputs with riverine flows.

Keywords: salinity, nutrients, transient water, water and substance flows, reservoir model, box model, Monte-Carlo method.