

УДК 551.468.6+556.545, PACS: 92.10.Sx; 92.20.ju; 92.05.Fg

БАЛАНСОВА МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТУ ТА МЕТАБОЛІЗМУ РОЗЧИНЕНИХ ФОРМ АЗОТУ І ФОСФОРУ В СИСТЕМІ ДНІСТРОВСЬКОГО ЛИМАНУ

Ю. П. Ільїн¹, М. А. Берлінський²

¹ Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
пр. Науки, 37, 03038, Київ, Україна, ypilyin@gmail.com

² Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, nberlinsky@ukr.net

З метою отримання кількісних оцінок потоків води та біогенних речовин в системі Дністровського лиману використано підхід біогеохімічного моделювання, рекомендований міжнародною програмою LOICZ. Інтегральна (резервуарна) модель системи складається з рівнянь балансу води, солоності та розчинених форм азоту і фосфору. Залучено інформацію річного циклу (з листопада 2003 по жовтень 2004 р.) гідрохімічних досліджень у гирлі річки Дністер та на виході з лиману у Чорне море, виконаних в рамках міжнародного проекту GEF/BSERP, а також гідрометеорологічних спостережень на морській гідрометстанції Білгород-Дністровській, морському гідрометеорологічному пості Царгородське гирло і навчальній базі Одеського державного екологічного університету.

У рівнянні водного балансу враховані потоки річкового стоку, атмосферних опадів та випаровування. Залишено невизначеність, пов'язану з неврахуванням підземного стоку. Застосування незалежної емпіричної оцінки адвективного потоку води через Царгородську протоку дозволило оцінити ступінь нестационарності рівнянь моделі на масштабах мінливості від місяця до року. Потік турбулентного обміну між естуарієм і прилеглим морем оцінюється з рівняння сольового балансу і визначається різницею між солоністю лиманних і морських вод.

Шляхом розрахунку щомісячних і річних величин встановлено, що для Дністровського лиману та подібних систем рівняння балансу води можна вважати стаціонарним, а потоками опадів та випаровування можна знехтувати: у порівнянні з річковим стоком, адвективним і турбулентним потоками водообміну вони на кілька порядків менші, тобто нижче межі похибок горизонтальних потоків води.

Спільна дія адвективного і дифузійного потоків забезпечувала загальний виніс біогенних речовин з екосистеми лиману. За річний цикл спостережень 2003-2004 років 73 % загального розчиненого фосфору та 92 % загального розчиненого азоту надійшло з лиману до моря у порівнянні з кількістю, внесеною до естуарію зі стоком річки Дністер.

Стехіометричний аналіз біогеохімічних залишків показав, що упродовж більшої частини року екосистема Дністровського лиману продукувала органічну речовину і споживала розчинений фосфор, а фіксація азоту в екосистемі переважала денітрифікацію.

Ключові слова: резервуарна модель; бокс-модель; солоність; біогенні речовини.

1. ВСТУП

Одним із секторів, виділених у Додатку ХХХ Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом та його державами-членами, з іншої сторони, є «Якість води та управління водними ресурсами, включаючи морське середовище». Головними документами стосовно екологічного моніторингу і управління ресурсами поверхневих і підземних вод, включно з річковими, перехідними (транзитними) і морськими водами є Водна рамкова директива та Директива про морську стратегію Європейського Парламенту і Ради Європи. Від-

повідно до цих документів та Водного кодексу України, *перехідні води – це поверхневі води у межах гирлової ділянки річки, а також лиманів, де відбувається змішування прісних та солоних вод*. Порядок здійснення державного моніторингу вод, затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 758 від 19 вересня 2018 р., відносить екологічний моніторинг перехідних вод до сфери відповідальності ДСНС України, а саме – мережі гідрометеорологічних обсерваторій, станцій і постів.

Таким чином, стають актуальними питання посилення наукових досліджень відкритих ли-

манів Чорного моря як об'єктів формування та транзиту перехідних вод, з метою вдосконалення системи моніторингу та інтерпретації отриманих даних.

Одною з важливих естуарних систем Причорномор'я є Дністровський лиман [1, 2]. Найбільш повний аналіз вивченості та фізико-географічний опис усіх складових його системи наведено в монографії [2]. Проблемою останніх десятирічч була відсутність регулярних експедиційних спостережень в лимані, а також вимірювань витрат води у гирлі р. Дністер в межах України за винятком навчальної бази Одеського державного екологічного університету (ОДЕКУ) у с. Маяки. Тому особливого значення набувають масиви даних спеціалізованих екологічних досліджень, які проводилися у минулому за підтримки національних та міжнародних наукових проєктів. Зокрема, в рамках Чорноморської екологічної програми в 2003-2004 роках виконувався міжнародний та міжвідомчий проєкт GEF/BSERP, спрямований на вивчення стану і наслідків евтрофікації Чорного моря, у тому числі навантаження на морську екосистему біогенних речовин (БР), які надходять у море зі стоком великих річок [3]. Результати були представлені на міжнародній конференції [4], а в роботах [5, 6] наведено аналіз отриманих гідрохімічних даних у порівнянні з матеріалами нечисленних попередніх досліджень.

Метою даної статті є кількісні оцінки складових бюджетів води та біогенних речовин в системі Дністровського лиману за даними річного циклу гідрологічних і гідрохімічних спостережень.

В основу дослідження покладено методологічний підхід балансового біогеохімічного моделювання, обґрунтований в роботах [7, 8] і використаний в рамках тривалого глобального міжнародного проєкту Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone (LOICZ) [9]. Як об'єкт моделювання Дністровський лиман є доволі простою мілководною (одношаровою) системою, що складається з одного резервуару (боксу), куди надходить вода з однієї ріки (Дністер), та який сполучений однією протокою з прилеглим морем.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Дані спостережень

В основу роботи покладено матеріали досліджень річного циклу (з листопада 2003 по жовтень 2004 р.) мінливості концентрацій та потоків БР в системі р. Дністер – Дністровський лиман –

Чорне море. Експедиційні роботи були організовані та проведені фахівцями Одеської філії Інституту біології південних морів (з 2014 р. – Інститут морської біології) НАН України. Відбір проб води виконувався щотижнево у двох пунктах – низов'я р. Дністер (с. Маяки) та гирло лиману (Царгородське гирло, с. Затока) (рис. 1).

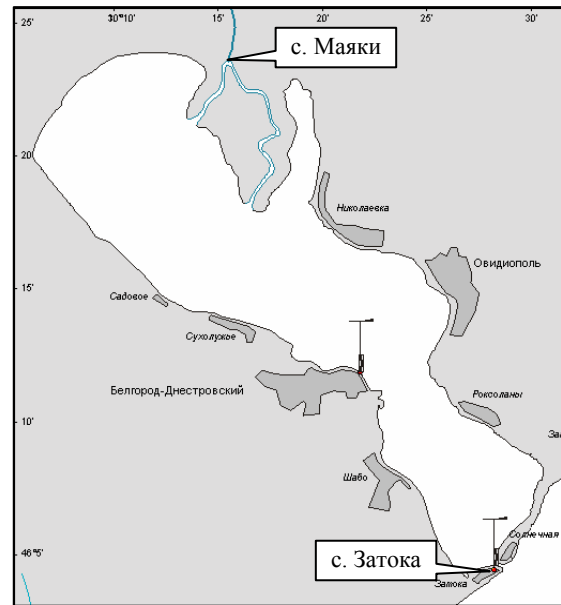


Рис. 1 – Схема Дністровського лиману та розташування пунктів спостережень

Fig. 1 – The scheme of the Dniester estuary and the location of observation points

Визначалися такі показники: температура та солоність (загальна мінералізація для річкової води), водневий показник рН, розчинений кисень, розчинені форми біогенних речовин (амонійний, нітритний, нітратний та загальний азот, фосфатний та загальний фосфор, кремнієва кислота). Крім того, щомісячно відбиралися проби для визначення вмісту завислої речовини, валового азоту і фосфору, а також розчиненої і валової органічної речовини (ОР) за перманганатною окиснюваністю у фільтрованій та нефільтрованій пробах. Вміст завислих фракцій БР та ОР визначався як різниця між їхнім валовим вмістом та вмістом розчинених фракцій [5, 6].

В ході робіт проводився зовнішній лабораторний контроль (інтеркалібрація) методів лабораторного визначення розчинених БР за допомогою сертифікованих зразків, що підтвердило достовірність отриманих натурних даних про БР.

На додаток до масиву гідрохімічних даних по пунктах Маяки й Затока, було створено масив щоденних спостережень за рівнем води і метеорологічними величинами у цих же пунктах (для с. Затока використані дані спостережень морсь-

кого гідрометеорологічного посту (МГП) Царгородське гирло). Крім того, для розрахунку потоків води та речовин у системі використані дані щоденних стандартних спостережень на морській гідрометстанції (МГ) Білгород-Дністровській. Витрати води р. Дністер визначалися за даними щоденних спостережень над рівнем у с. Маяки, за допомогою кривої зв'язку між витратами і рівнем, побудованої за даними вимірювань витрат води на навчальній базі ОДЕКУ (с. Маяки).

2.2 Балансова модель

Результати річного циклу гідрологічних і гідрохімічних спостережень у гирлі р. Дністер, на МГ Білгород-Дністровській і у Царгородському гирлі дозволяють оцінити потоки води і біогенних речовин, необхідні для побудови балансової моделі (бокс-моделі) Дністровського лиману. Відповідно до методичного підходу, рекомендованого в [7, 9] і застосованого для багатьох прибережних зон світу підчас та після закінчення міжнародного проекту LOICZ (наприклад, [9-12]), інтегровані по об'єму лиману диференціальні рівняння балансу води, солоності та неконсервативної речовини можуть бути записані у наступному вигляді:

$$dV/dt = Vq + Vp - Ve - Vr; \quad (1)$$

$$d(SV)/dt = S(dV/dt) + V(dS/dt) = VqSq - VrSr + Vx(Sr-S); \quad (2)$$

$$d(CV)/dt = C(dV/dt) + V(dC/dt) = VqCq - VrCr + Vx(C-Cr) + \Delta_C, \quad (3)$$

де V – об'єм лиману; Vq , Vp , Ve , Vr – об'ємні потоки води, що надходить з річки, з атмосферними опадами, витрачається з випаровуванням та через протоку у відкрите море, відповідно; усі ці потоки можуть бути оцінені за даними вимірювань. Vx – 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 , Sq , Sr – солоність води в лимані, гирлі ріки та у протоці відповідно. C , Cq , Cr – концентрації БР в лимані, гирлі ріки і у протоці. Δ_C – неконсервативний потік речовини, що визначається біогеохімічними взаємодіями у воді лиману; він має сенс різниці між сумою усіх внутрішніх джерел і сумою усіх внутрішніх 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 лимані розраховується за формулою: $Tr = V / (|Vr| + |Vx|)$ [7, 9].

Серед потоків моделі (1-3) не враховано підземний стік води і біогенних речовин, оскільки синхронні дані про них відсутні. Оцінки [1] показали, що величина підземного стоку води в лиман на порядок менше, ніж річковий стік. Тому залишається пов'язана з цим невизначеність моделі, хоча вона зазвичай не перевищує похибки розрахунку річкового стоку [7].

Блок-схему балансової моделі зображено на рис. 2.

У рівняннях (1-3) Vr 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 [7, 9]. Однак, ми не можемо *a priori* нехтувати змінами об'єму лиману, оскільки коливання рівня води можуть бути співставними з його глибиною (середня глибина 1.6 м). Нажаль, у 2003-2004 рр. прямі вимірювання течій у протоці були неможливі, тому для оцінки адекватного потоку у протоці був застосований наступний підхід.

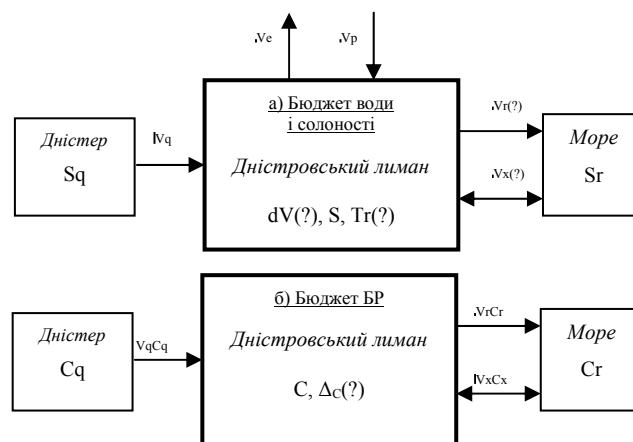


Рис. 2 – Структура бокс-моделі системи Дністровського лиману. Знаком (?) помічені величини, що підлягають визначенню

Fig. 2 – The structure of the box model of the Dniester estuary system. The sign (?) shows the values to be determined

В результаті експедиційних досліджень гідрометеорологічної служби 1979-1987 рр. отримано багато даних вимірювань течій в Царгородському гирлі (1841 вимірювання на розрізі через протоку та 6625 реєстрацій течій на автономній буйковій станції). Було встановлено, що течії у протоці варіюють переважно під впливом стоку р. Дністер і вітрових нагонів, що відтворюється також і в коливаннях рівня води у ли-

мані. На основі цього масиву даних був розроблений емпіричний метод, що дозволяє оцінити результуючий потік у протоці за даними про рівень, виміряний на МГ Білгород-Дністровський (центральна частина лиману) і витрат р. Дністер [13]. Для розрахунку щодобових значень сумарного адвективного потоку у протоці отримане емпіричне рівняння (потоки у $\text{м}^3\text{с}^{-1}$):

$$Vr = Vq - 29.6\Delta h - 6.0, \quad (4)$$

де Δh (см) – зміна середньодобового рівня води між розрахунковою і попередньою добою за даними самописця рівня моря МГ Білгород-Дністровський; Vq – витрати ріки за даними спостережень у с. Маяки за попередню добу (середній час «добігання» річкової води від гирла ріки до виходу з лиману оцінюється в 1 добу). Було показано, що даний підхід забезпечує прийнятну похибку оцінки результуючого адвективного потоку у Царгородському гирлі з імовірністю 96%. Таким чином, за допомогою формули (4) були розраховані щодобові значення Vr , у тому числі і для усіх дат щотижневого відбору проб на гідрохімічні величини. Завдяки такому підходу вдалося не вдаватися до припущення щодо стаціонарності рівняння (1) і оцінити величини часових варіацій об'єму Дністровського лиману.

Усі подальші обрахунки проводилися за до-

помогою програми, створеної в середовищі електронних таблиць EXCEL з метою оцінки середньомісячних та річних величин потоків, солоності та концентрацій розчинених БР. Потоки атмосферних опадів та випаровування отримані за даними метеорологічних спостережень на МГ Білгород-Дністровський.

Величини dV/dt , знайдені з рівняння (1), використовувалися для розрахунку потоку турбулентного перемішування Vx з рівняння (2), де солоність у гирлі ріки Sq оцінювалася за вимірюваннями у с. Маяки; у протоці Царгородське гирло – за даними спостережень у с. Затока; солоність води лиману – за даними МГ Білгород-Дністровський. Площа Дністровського лиману прийнята рівною 408 км^2 , об'єм – $0,733 \text{ км}^3$ у відповідності до [2].

Слід зазначити, що, на відміну від детальних чисельних моделей на основі систем диференціальних рівнянь руху води, перенесення та еволюції речовин (наприклад, [14]), 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 і дозволяють коректно організувати та інтерпретувати дані спостережень.

Таблиця 1 - Місячні та річні оцінки солоності і складових водного балансу у системі Дністровського лиману за даними спостережень 2003-2004 років

Table 1 – Monthly and annual estimates of salinity and water balance components in the Dniester estuary system according to observations of 2003-2004

Місяць	Sq	S	Sr	Vq	Vr	Vp	Ve	dV	Vx	Tr
	‰			км^3						
XI	0,65	2,55	15,81	0,903	0,820	0,010	0,007	0,076	0,939	12,4
XII	0,5	2,18	8,89	0,852	0,853	0,011	0,008	0,002	1,027	12,1
I	0,48	2,62	11,93	0,975	0,979	0,038	0,010	0,024	1,245	10,2
II	0,5	2,35	15,03	0,922	0,817	0,008	0,009	0,104	0,936	12,1
III	0,51	1,91	9,01	1,027	1,077	0	0,013	-0,063	1,230	9,9
IV	0,45	0,82	5,08	1,092	1,040	0	0,038	0,014	0,940	11,1
V	0,41	0,80	3,08	1,263	1,246	0,045	0,041	0,022	1,457	8,4
VI	0,38	1,37	7,89	0,951	0,988	0	0,052	-0,089	1,185	10,1
VII	0,43	1,90	6,83	0,846	0,831	0,033	0,043	0,005	1,158	11,4
VIII	0,38	0,52	3,64	1,079	1,028	0,007	0,054	0,004	0,745	12,8
IX	0,41	1,62	13,13	0,835	0,838	0,011	0,048	-0,041	0,990	12,0
X	0,41	0,92	8,21	0,816	0,838	0,011	0,016	-0,027	0,824	13,7
Середнє	0,46	1,63	9,04	-	-	-	-	-	-	11,4
Сума	-	-	-	11,558	11,363	0,174	0,339	0,030	12,676	-

3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Водний і сольовий бюджети

Результати розрахунку місячних і річних значень складових водного і сольового бюджетів Дністровського лиману представлені у табл. 1.

З цієї таблиці видно, що місячні і річні значення Vq , Vr і Vx є співставними величинами, а інші потоки – на 1-3 порядки меншими. Таким чином, при розрахунках сезонних і міжрічних змін водного і сольового балансів Дністровського лиману, потоки опадів та випаровування можна не враховувати, як і флуктуації об'єму (рівня води) системи. Останнє означає, що на річному і місячному (сезонному) масштабах мінливості рівняння водного балансу для системи Дністровського лиману та аналогічних систем мілких безприпливних естуаріїв може бути прийняте стаціонарним. У травні спостерігався абсолютний максимум притоку річкової води, її витоку через гирло лиману та турбулентного обміну з водою прилеглого моря, а також абсолютний мінімум солоності води у Царгородському гирлі.

На цей же місяць припадає мінімальний час оновлення води лиману (8,4 днів) завдяки інтенсивній промивці системи річковим стоком. Середнє за річний цикл значення цього показника 11,4 днів.

3.2 Бюджети біогенних речовин

Використовуючи величини середньомісячних потоків (табл. 1), отриманих за даними спостережень та з рівнянь «гідрологічного» бюджету (1, 2), можна визначити складові бюджету речовини, а потім і залишковий член ΔC , з рівняння (3) для кожної БР, що досліджується. Оскільки гідрохімічні спостереження у центральній частині лиману не проводилися, величини C оцінювалися як середньоарифметичні з концентрацій у гирлі річки та протоці: $C = (Cq + Cr) / 2$.

У табл. 2, 3 представлені результати оцінки місячних і річних величин складових бюджету розчинених фракцій фосфору і азоту.

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 (амонійний + нітритний + нітратний) і розчиненого органічного азоту: $TDN = DIN + DON$. У даному випадку концентрації TDP і TDN – величини, що вимірювалися, як і DIP та DIN . Табл. 2, 3 містять також по два додаткові стовпчики, 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 (у відсотках):

Таблиця 2 - Місячні та річні оцінки складових бюджету загального розчиненого фосфору у воді Дністровського лиману за даними спостережень 2003-2004 років

Table 2 – Monthly and annual estimates of the total dissolved phosphorus budget components in the Dniester estuary water according to observations of 2003-2004

Місяць	$D(VC)$	$VqCq$	$VrCr$	$Vx(C-Cr)$	ΔC	Залишок	Винос
	Тони					%	
XI	3,626	90,663	40,871	20,723	-25,4415	-28,1	67,9
XII	15,177	112,321	68,717	42,940	14,51299	12,9	99,4
I	-6,542	111,471	94,894	23,915	0,796065	0,7	106,6
II	2,684	110,938	28,048	35,468	-44,738	-40,3	57,3
III	-16,077	101,167	20,312	49,100	-47,9231	-47,4	68,5
IV	-10,410	67,901	11,462	21,586	-45,2639	-66,7	48,7
V	3,062	100,962	21,343	45,400	-31,1566	-30,9	66,1
VI	5,383	89,300	46,358	33,753	-3,80564	-4,3	89,7
VII	3,071	87,067	18,903	48,887	-16,2045	-18,6	77,9
VIII	12,715	137,163	35,886	35,179	-53,383	-38,9	51,8
IX	1,727	101,106	23,830	37,014	-38,5352	-38,1	60,2
X	-2,569	100,681	52,327	24,407	-26,5158	-26,3	76,2
Середнє	-	-	-	-	-	-27,2	72,5
Сума	11,847	1210,739	462,952	418,282	-317,658	-	-

$$\text{Залишок} = 100\Delta_C / VqCq;$$

$$\text{Винос} = 100[VrCr + Vx(C - Cr)] / VqCq.$$

У нижньому рядку цих стовпчиків дані середньорічні величини *Залишку* і *Виносу*.

Інтерпретація неконсервативних (залишкових) складових балансу БР може бути зроблена за допомогою стехіометричного аналізу LOICZ [7, 9].

Кількість загального розчиненого фосфору, що надходить у сумі за рік до лиману з річковою водою, складає 1,21 тисяч тон, а сумарний винос до прилеглого моря за рахунок процесів адвекції і турбулентного перемішування $0,46 + 0,42 = 0,88$ тисяч тон за рік (у середньому, 72,5 % від річкового надходження).

Близько 0,32 тисяч тон ($1,02 \cdot 10^{10}$ моль) *TDP* витрачається за рік у лимані, беручи участь у сумарному (органічному) метаболізмі екосистеми (СМЕ). Від'ємна величина залишкового члена означає, що екосистема є виробником органічної речовини і споживачем *TDP*.

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 $(p - r) = -106\Delta_{TDP} = 1,08 \cdot 10^{12}$ моль вуглецю за рік.

Таким чином, первинна продукція органічної речовини у Дністровському лимані набагато більша, ніж респірація.

Кількість загального розчиненого азоту, що надійшов протягом року до лиману з річковим стоком, складає 32,14 тисяч тон, а сумарний винос у море за рахунок процесів адвекції і турбулентного перемішування $24,57 + 5,52 = 30,09$ тисяч тон за рік (у середньому, 91,5 % від річкового надходження).

Близько 3,88 тисяч тон ($5,44 \cdot 10^{10}$ моль) *TDN* витратилося за рік у лимані (неконсервативний залишок від'ємний). Величина метаболізму азоту в екосистемі, яка є різницею між фіксацією азоту і денітрифікацією (*nfix - denit*), може бути оцінена як різниця між спостереженим і розрахованим значеннями Δ_{TDN} . Останнє знаходиться по формулі $\Delta_{TDN}^{exp} = \Delta_{TDP}(N:P)$, де (*N:P*) = (16:1) – співвідношення Редфілда між азотом і фосфором. Таким чином, отримуємо: $\Delta_{TDN}^{exp} = -16,32 \cdot 10^{10}$ моль/рік; (*nfix-denit*) = $(-5,44 - (-16,32)) \cdot 10^{10} = 1,088 \cdot 10^{11}$ моль азоту за рік. Це означає, що у сумі за річний цикл спостережень у Дністровському лимані процес фіксації азоту превалював над процесом денітрифікації, внаслідок чого утворилося 7,771 тисяч тон фіксованого азоту.

Таблиця 3 - Місячні та річні оцінки складових бюджету загального розчиненого азоту у воді Дністровського лиману за даними спостережень 2003-2004 років

Table 3 – Monthly and annual estimates of the total dissolved nitrogen budget components in the Dniester estuary water according to observations of 2003-2004

Місяць	$d(VC)$	$VqCq$	$VrCr$	$Vx(C-Cr)$	Δ_C	Залишок	Винос
	Тони					%	
XI	346,040	4117,345	3795,469	65,491	89,655	2,2	93,8
XII	-1436,780	2263,339	3270,996	84,947	-344,176	-15,2	148,3
I	73,344	3625,233	3201,075	724,997	374,182	10,3	108,3
II	-554,220	2235,227	994,668	510,190	-1284,59	-57,5	67,3
III	-10,005	2992,835	1008,515	1179,842	-814,483	-27,2	73,1
IV	155,326	2658,009	1204,049	539,727	-758,907	-28,6	65,6
V	336,381	3790,893	3312,312	629,469	487,269	12,9	104,0
VI	29,042	3250,361	3499,426	284,077	562,185	17,3	116,4
VII	-840,794	1588,769	1104,586	364,583	-960,394	-60,4	92,5
VIII	-43,262	1867,093	1686,181	141,741	-82,434	-4,4	97,9
IX	12,004	1603,561	571,405	342,363	-677,790	-42,3	57,0
X	99,385	2146,413	918,556	654,849	-473,622	-22,1	73,3
Середнє	-	-	-	-	-	-17,9	91,5
Сума	-1833,539	32139,078	24567,239	5522,274	-3883,10	-	-

4. ВИСНОВКИ

З метою отримання коректних кількісних оцінок потоків води та біогенних речовин в системі Дністровського лиману використано підхід біогеохімічного моделювання, рекомендований програмою LOICZ. Інтегральна (резервуарна) модель системи складається з рівнянь балансу води, солоності та розчинених форм азоту і фосфору.

Залучено інформацію річного циклу (з листопада 2003 по жовтень 2004 р.) гідрохімічних досліджень у гирлі річки Дністер та на виході з лиману у Чорне море, виконаних в рамках міжнародного проєкту GEF/BSERP, а також гідрометеорологічних спостережень на МГ Білгород-Дністровський, МГП Царгородське гирло і навчальній базі ОДЕКУ.

У рівнянні водного балансу враховані потоки річкового стоку, атмосферних опадів та випаровування. Залишено невизначеність, пов'язану з неврахуванням підземного стоку, яка *a priori* вважається меншою за похибку розрахунку річкового стоку.

Застосування незалежної емпіричної оцінки адвективного потоку води через Царгородську протоку дозволило оцінити ступінь нестационарності рівнянь моделі на масштабах мінливості від місяця до року.

Потік турбулентного обміну між естуарієм і прилеглим морем оцінюється шляхом обернення рівняння сольового балансу і визначається різницею між солоністю лиманних і морських вод.

Шляхом розрахунку щомісячних і річних величин встановлено, що для Дністровського лиману та подібних систем рівняння балансу води можна вважати стаціонарним, а потоками опадів та випаровування можна знехтувати: у порівнянні з річковим стоком, адвективним і турбулентним потоками водообміну вони на кілька порядків менші, тобто нижче межі похибок горизонтальних потоків води.

Спільна дія адвективного і дифузійного потоків протягом року забезпечувала загальний вивід біогенних речовин з екосистеми лиману.

Оцінки місячних і річних величин складових балансу біогенних речовин в системі «Дністер – Дністровський лиман – Чорне море» дозволяють коректно оцінити показники транспорту БР та біогеохімічні залишки, як наслідки внутрішніх взаємодій в екосистемі лиману.

За річний цикл спостережень 2003-2004 років 73 % загального розчиненого фосфору та 92 % загального розчиненого азоту надійшло з лиману до моря у порівнянні з кількістю, внесеною до

естуарію зі стоком річки Дністер.

Стехіометричний аналіз біогеохімічних залишків на основі співвідношень Редфілда показав, що упродовж більшої частини року екосистема Дністровського лиману продукувала органічну речовину і споживала розчинений фосфор, а фіксація азоту в екосистемі переважала денітрифікацію.

Наведені таблиці щомісячних та річних оцінок складових балансів води, солей, розчинених форм фосфору та азоту можуть у подальшому служити базою для порівняння результатів і вдосконалення діючої системи моніторингу перехідних вод, що продукуються і постачаються в Чорне море гирловою областю Дністра.

ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку всім учасникам експедиційних та лабораторних досліджень, завдяки яким стала можливою дана робота, а також шановним рецензентам за цінні зауваження щодо назви і тексту статті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья : монография. Киев: Наук. думка, 1990. 240 с.
2. Шуйский Ю. Д. Физическая география устьевой области Днестра : монография. Одесса: Астропринт, 2013. 328 с.
3. Исследования поступления биогенных веществ в Черное море с речным стоком в рамках международного проекта BSERP/GEF / Ильин Ю. П., Репетин Л. Н., Морозов В. Н. и др. *Екологічні проблеми Чорного моря*: зб. матеріалів до 6-го Міжнародного Симпозіуму, 11-12 листопада 2004 р., м. Одеса. Одеса: ОЦНТЕІ, 2004. С. 198-202.
4. Ilyin Y. P., Berlinskiy N. A. Nutrients input from the riverine sources to the Black Sea by direct measurements. *Abstracts of 1st Biannual Scientific Conference "Black Sea Ecosystem 2005 and Beyond" (8-10 May 2006, Istanbul, Turkey)*. Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution, 2006. Pp. 142-143.
5. Многолетняя изменчивость биогенного стока Днестра / Берлинский Н. А. и др. *Еколого-економічні проблеми Днестра*: сб. науч. статей / отв. ред. В.М. Небрат. Одесса: ИНВАЦ, 2006. С. 12-15.
6. Многолетняя изменчивость стока биогенных веществ Днестра / Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И., Берлинский Н. А. и др. *Водные ресурсы*. 2008. Т. 35. № 6. С. 1-8.
7. LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines / Gordon

- D.C. Jr. et al. *LOICZ Research & Studies*. 1996. 5. VI+96 pp.
8. Murray J. W. Chapter 2: Mass Balance - The Cornerstone of Chemical Oceanography. *University of Washington, Lecture notes*. 2004. 27 p. https://www.ocean.washington.edu/courses/oc400/Lecture_Notes/CHPT2.pdf
 9. *Proceedings of the LOICZ Workshop on biogeochemical budget methodology and applications*. Providence, Rhode Island, November 9-10, 2007. LOICZ Research & Studies / Edited by Swaney D. P., Giordani G. 2011. 37. 195 p.
 10. The fate of phosphorus in the Yangtze (Changjiang) Estuary, China, under multi-stressors: Hindsight and forecast / Xu, H., et al. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2015. 163. Pp. 1-6.
 11. Kiwango H., Njau K. N., Wolanski, E. The application of nutrient budget models to determine the ecosystem health of the Wami Estuary, Tanzania. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2018. 18 (2). Pp.107-119.
 12. Ільїн Юрій. 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, 2021. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10747.44324>
 13. Уточнить параметры водо-, соле- и теплообмена через Кинбурнский и Цареградский проливы, а также водообмена внутри дельты Днепра, в современных условиях и при различных объемах изъятия стока / Симов В. Г., Морозов В. Н., Миньковская Р. Я. и др. Промежуточный отчет по теме НИР № II.16a.13. Рукопись: Научный фонд МО УкрГМИ: Севастополь, 1989. 262 с.
 14. Тучковенко Ю. С., Тучковенко О. А. Модель эвтрофикации морских и лиманских экосистем северо-западного Причерноморья. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 21. С. 75-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08>
- measurements. *Abstracts of 1st Biannual Scientific Conference "Black Sea Ecosystem 2005 and Beyond" (8-10 May 2006, Istanbul, Turkey)*. Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution, pp. 142-143.
5. Berlinsky, N.A. et al. (2006). Mnogoletniaya izmenchivost' biogennogo stoka Dnestra [Long-term variability of the Dniester River nutrients discharge]. *Ekologo-economicheskie problemy Dnestra: sb. nauch. statey [Environmental and economic problems of the Dniester River: collected papers]*. Edited by V.M. Nebrat. Odessa: INVAC, pp. 12-15. (in Russ.)
 6. Garkavaya, G.P. et al. (2008). Mnogoletniaya izmenchivost' biogennogo stoka Dnestra [Multi-annual variability of nutrients discharge of the Dniester River]. *Vodnie resursi [Water resources]*, 35 (6), pp. 1-8. (in Russ.)
 7. Gordon, D.C. Jr. et al. (1996). LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. *LOICZ Research & Studies*, 5, VI+96 pp.
 8. Murray, J.W. (2004). Chapter 2: Mass Balance - The Cornerstone of Chemical Oceanography. *University of Washington, Lecture notes*. https://www.ocean.washington.edu/courses/oc400/Lecture_Notes/CHPT2.pdf
 9. Swaney, D.P., & Giordani, G. (eds). (2011). *Proceedings of the LOICZ Workshop on biogeochemical budget methodology and applications*. Providence, Rhode Island, November 9-10, 2007. *LOICZ Research & Studies*, 37.
 10. 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, pp. 1-6.
 11. 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), pp. 107-119.
 12. Ільїн, Юрій. (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. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10747.44324>
 13. Simov, V.G. et al. (1989). *To specify the parameters of water, salt and heat exchange through the Kinburn and Tsargorod straits, as well as water exchange inside the Dnieper delta, for the modern conditions and at the different volumes of discharge withdraw*. Interim report on the research study No. II.16a.13. Sevastopol: Manuscript. Sci. fund of MB UHMI. 262 p. (in Russ.)
 14. Tuckovenko, Yu.S., Tuckovenko, O.A. (2018). The model of eutrophication of marine and estuarine ecosystems in the Northwest Black Sea region. *Український гідрометеорологічний журнал [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 21, pp. 75-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08>

REFERENCES

1. Timchenko, V.M. (1990). *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya [Environmental and hydrologic studies of water ponds on the North-Western Black Sea shores]*. Kiev: Naukova Dumka. (in Russ.)
2. Shuiskiy, Yu.D. (2013). *Fizicheskaya geografiya ustyevoy oblasti Dnestra [Physical geography of the Dniester mouth area]*. Odessa: Astroprint. (in Russ.)
3. Ільїн, Ю.П. et al. (2004). Issledovaniya postupleniya biogennykh veshchestv v Chernoe more s rechnym stokom v ramkakh mezhdunarodnogo proekta BSERP/GEF [Studies of nutrients input to the Black Sea with riverine discharge in the international project BSERP/GEF frameworks]. *Environmental problems of the Black Sea: Proc. of 6th International Symposium, 11-12 November, 2004, Odessa, Ukraine*. Odessa: OCSTI, pp. 198-202. (in Russ.)
4. Ільїн, Y.P. & Berlinskiy, N.A. (2006). Nutrients input from the riverine sources to the Black Sea by direct

BALANCE MODEL OF DISSOLVED NITROGEN AND PHOSPHORUS TRANSPORTATION AND METABOLISM IN THE DNIESTER ESTUARY SYSTEM

Yu. P. Ilyin¹, N. A. Berlinsky²

¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute,
Pr. Nauky, 37, 03038, Kyiv, Ukraine, ypilyin@gmail.com

² Odessa State Environmental University,
Lvivs'ka St., 15, 65016, Odesa, Ukraine, nberlinsky@ukr.net

In order to obtain quantitative estimates of water and nutrient fluxes into the Dniester estuary system, the biogeochemical modeling approach recommended by the international program LOICZ was used. The integral (reservoir) model of the system consists of balance equations for water, salinity and dissolved forms of nitrogen and phosphorus. The research involves the information of the annual cycle (from November 2003 to October 2004) of hydrochemical studies at the mouth of the Dniester River and at the exit of the estuary to the Black Sea carried out within the framework of the international project GEF/BSERP, as well as the data of hydrometeorological observations at Belgorod-Dniestrovsky hydrometeorological station, Tzargorod Gyrlo hydrometeorological post and Odesa State Environmental University training base.

The water balance equation takes into account the flows of river runoff, precipitation and evaporation. Uncertainty associated with the failure of taking into account the underground runoff still remained. The use of an independent empirical assessment of the advective water flow through the Tzargorod Strait made it possible to estimate the degree of non-stationarity of the model equations on the scale of variability from a month to a year. The flow of turbulent exchange between the estuary and the adjacent sea is estimated by means of the salt balance equation and is determined by the difference between the estuary and marine water salinity.

By calculating the monthly and yearly values it was established that, for the Dniester estuary and similar systems, the water balance equation can be considered as stationary while the precipitation and evaporation flows can be neglected: compared to the river runoff, advective and turbulent water exchange flows they are several orders of magnitude lower, that is, below the limit of errors of horizontal water flows.

The joint action of the advective and diffusion flows ensured the overall removal of nutrients from the estuary ecosystem. During the annual cycle of 2003-2004 observations 73% of total dissolved phosphorus and 92% of total dissolved nitrogen entered the sea from the estuary compared to the amount reaching the estuary with the Dniester River runoff.

Stoichiometric analysis of biogeochemical residuals showed that, for most of the year, the ecosystem of the Dniester estuary produced organic matter and consumed dissolved phosphorus, while the nitrogen fixation in the ecosystem outweighed the denitrification process.

Keywords: reservoir model, box-model, salinity, nutrients.

Подання до редакції : 09. 02. 2022

Надходження остаточної версії : 09. 05. 2022

Публікація статті : 07. 07. 2022