

# Природничо-географічні дослідження

## Natural and Geographical Research

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2026.01.008>

Степаненко С. М.

ORCID: 0000-0002-6343-3968

Інститут ринку та економіко-екологічних досліджень Національної академії наук України, Одеса

### Вплив контрольованого вилучення самосадної солі на водно-сольовий режим Куяльницького лиману

УДК 556.5:551.468.6:504.05:661.422(477.74)(045)

У роботі кількісно оцінено потенційний вплив експлуатації відгородженого майданчика для збору самосадної солі на водно-сольовий режим Куяльницького лиману (Одеська область). Розроблено та застосовано сезонну (травень-жовтень) рекурентну модель водно-сольового балансу з явним «резервуаром твердої солі» з використанням наявних даних спостережень. Майданчик площею 10 га розглянуто як локальний випарник з робочою глибиною 0,25 м, двома літніми циклами роботи та пониженням рівня стовпчика ропи в кожному циклі до  $h_i = 0,02$  м з подальшим поповненням ропою з основної акваторії через відкритий прохід до вирівнювання рівнів. Показано, що за прийнятого сценарію річне вилучення солі становить близько 11,0 тис. т, що відповідає зменшенню середньої солоності великої акваторії приблизно на 0,2‰ за рік за умов подачі морської води  $\sim 10$  млн м<sup>3</sup> у холодний сезон. Виявлено, що ефект змішування після кожного циклу не є самостійним чинником опріснення; зменшення солоності зумовлене саме вилученням твердих солей. Сформульовано рекомендації щодо сезонної експлуатації відокремленого майданчика та мінімізації ризиків для гідро-екологічного стану лиману.

**Ключові слова:** Куяльницький лиман; водний баланс; сольовий баланс; гіперсолоні водойми; самосадна сіль; випаровування; рекурентна модель; гідроекологічне управління.

#### Актуальність теми дослідження

Куяльницький лиман є унікальною гіперсолонною лагунною водоймою Північно-Західного Причорномор'я з високою рекреаційною та бальнеологічною цінністю. Упродовж останніх десятиліть водно-сольовий режим лиману зазнає значного антропогенного та кліматичного впливу: катастрофічно зменшується приплив прісних вод із водозбору, зростають втрати на випаровування, змінюються морфометричні характеристики та збільшується мінералізація ропи до рівнів 350‰

і вище [1–2]. У таких умовах можливе винесення солей з оголеного дна вітром і засолення прибережних земель [3]. Починаючи з грудня 2014 р. у холодний сезон запроваджено регульовану подачу морської води для підтримання рівня лиману та пом'якшення його осолонення [2]. Подача морської води розглядалася як тимчасовий вимушений захід на час відновлення повноцінного живлення лиману прісною водою [4–5]. Але досі жодний захід з відновлення живлення прісною водою не був здійснений. Тому подача морської

#### Цитування:

Степаненко С. М. (2026). Вплив контрольованого вилучення самосадної солі на водно-сольовий режим Куяльницького лиману. Український географічний журнал. 1, 8–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2026.01.008>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026.



Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

води протягом останніх 11 років залишається основним джерелом балансування водного режиму Куяльницького лиману, і за час такого експлуатаційного режиму до лиману надійшло приблизно 1,2–1,5 млн тон морської солі, що викликає обґрунтовані побоювання [6] щодо негативного впливу такого збільшення кількості солі в лимані на 12–15 % від стану 2014 р.

Разом з тим, в акваторії лиману історично існували солепромисли, тому науковцями [1–6] з початку обговорення проекту подачі морської води в лиман пропонується відновлення контрольованого вилучення самосадної солі як одного із потенційних інструментів управління сольовим балансом Куяльницького лиману. Однак в науковій літературі досі немає жодних кількісних оцінок можливого впливу на водно-сольовий режим Куяльницького лиману відновлення контрольованого вилучення самосадної солі на відокремленій ділянці (майданчику) лиману.

**Метою роботи** є кількісне оцінювання впливу на водно-сольовий режим Куяльницького лиману відновлення контрольованого вилучення самосадної за рахунок створення відокремленої ділянки (майданчику) умовною площею 10 га, за допомогою розробленої двосезонної рекурентної моделі (травень–жовтень) з явним «резервуаром твердої солі»; кількісне оцінювання впливу експлуатації відгородженого майданчика площею 10 га на сольовий баланс та середню мінералізацію Куяльницького лиману. Окремо розглянуто інженерну модель літнього режиму роботи майданчика і роль змішування ропи в двох водоймах після кожного циклу вилучення самосадної солі.

### Методи дослідження

При розробці моделі календарний рік було поділено на два інтегральні сезони: холодний (Ост → Май(1)) та теплий (Май(2) → Сер). У холодний сезон домінують процеси поповнення лиману водою — в ньому зосереджена регульована подача морської води (грудень–квітень), а також основна частина атмосферних опадів і прісного стоку з водозбору. Жовтень у цьому поділі досить умовно віднесено до холодного періоду як перехідний місяць початку сезону поповнення лиману водою. У теплий сезон домінують втрати на випаровування, а частина північної мілководної акваторії може пересихати, що зменшує ефективну площу випаровування. Травень розглядається в моделі як перехідний: перша

половина травня віднесена до холодного періоду (продовження поповнення), а друга половина — до теплого періоду (початок інтенсивного випаровування); опади травня поділено порівну між цими кроками.

Для розрахунків застосовано сезонно-усереднену балансову «box-модель» (модель зосереджених параметрів), у якій водно-сольовий режим Куяльницького лиману описується системою взаємодіючих резервуарів. У холодний сезон лиман розглядається як один змішаний резервуар із характерними сезонними притоками/втратами. У теплий сезон система розглядається як два окремі резервуари: основна акваторія лиману та відокремлений майданчик керованого вилучення самосадної солі, розділені дамбою. Протягом теплого сезону майданчик працює циклічно за схемою «ізоляція → випаровування та кристалізація → вилучення осадженої солі → короткочасне сполучення з основною акваторією для вирівнювання рівнів», після чого цикл повторюється. Модель є рекурентною, тобто задає відображення «перший стан системи → другий стан системи» між контрольними моментами року (жовтень – травень – жовтень) і може багаторазово застосовуватися для послідовних річних



Рис. 1. Розташування об'єкта дослідження (знімок з Google Earth [earth.google.com])

циклів, що дозволяє оцінювати як сезонні зміни, так і багаторічний тренд середньої солоності.

На відміну від детальних гідродинамічних чисельних моделей (2D/3D), які розв'язують рівняння руху та перенесення з малим кроком часу і відтворюють просторову неоднорідність (зокрема підходів на базі Delft3D-FLOW [7]), запропонована сезонна рекурентна схема є прозорою спрощеною конструкцією для швидкої перевірки сценаріїв водно-сольового балансу та кількісної оцінки внеску керованого вилучення самосадної солі (через член  $G$  у рівнянні «резервуара твердої солі»), а також ролі змішування між основною акваторією та майданчиком після кожного циклу. Таким чином, призначення сезонної рекурентної схеми — не заміна 3D-моделювання, а інтегральна оцінка масштабу ефектів і аналіз впливу ключових параметрів для інженерно-управлінських рішень.

### Виклад основного матеріалу з обґрунтуванням наукових результатів

#### Район дослідження та його характеристики за даними досліджень

Куюльницький лиман, розташований на північ від м. Одеса, відокремлений від Чорного моря піщаним пересипом. Він належить до водойм із сильно вираженою сезонною мінливістю рівня, площі водного дзеркала та мінералізації ропи (див. *рис. 1*). У різних літературних джерелах площа акваторії лиману та його середня глибина подаються з істотними відмінностями. Так, за даними роботи [8] площа акваторії лиману залежно від рівня води коливається в межах 19–74 км<sup>2</sup>, а його середня глибина ( $h_p$ ) оцінюється в межах до  $\approx 1$  м. У той же час, за узагальненнями робіт [9, 10] характерний діапазон водного дзеркала лиману становить 25–60 км<sup>2</sup>, а середня товща води не перевищує приблизно 0,30–0,70 м; в окремі роки фіксується випадання солей в осад на дно.

Через таку мінливість характеристик для параметризації водного балансу в роботі використано дані останнього комплексного обстеження Куюльницького лиману за 2021 р. [2]: середня площа водної поверхні лиману  $\bar{A} \approx 41,5$  млн м<sup>2</sup>, випаровування з водної поверхні  $E_B = 22,7$  млн м<sup>3</sup>, а сумарне надходження води — 37,7 млн м<sup>3</sup>, зокрема: атмосферні опади — 19,8 млн м<sup>3</sup>, морська

вода — 10,4 млн м<sup>3</sup> та інші притоки — 7,5 млн м<sup>3</sup>. За таких умов рівень ропи у лимані протягом 2021 р. зріс на  $\sim 0,12$  м.

Зазначимо, що наведена у [2] «середня площа водної поверхні» ( $\approx 41,5$  км<sup>2</sup>) є річним усередненням для 2021 р. Тому у сценарних розрахунках для теплого сезону року в роботі додатково використано ефективну площу дзеркала  $\bar{A} \approx 39,65$  км<sup>2</sup>, що відображає сезонне зменшення акваторії через літнє підсихання (переважно північної частини лиману).

Оцінювання солевнесення морською водою виконано за даними монографії [1]: у період 22 грудня 2014 — 20 квітня 2015 р. до лиману надійшло 10,109 млн м<sup>3</sup> морської води із середньою мінералізацією 13,43 г/дм<sup>3</sup>, що відповідає надходженню солей масою 0,136 млн т. Для спрощення розрахунків будемо вважати, що щорічно до Куюльницького лиману з морською водою надходить саме така кількість солі.

Вплив мінералізації ропи на випаровування враховано параметрично [1]. У загальному випадку для гіперсолоних водойм інтенсивність випаровування зменшується порівняно з прісною водою, що може бути описано солонісною поправкою  $f(S)$ :

$$E = E_0 \times f(S),$$

де  $0 < f(S) < 1$ .

У цій роботі як базову величину випаровування з водної поверхні використано значення  $E_B = 22,7$  млн м<sup>3</sup> за матеріалами комплексного обстеження 2021 р. [2]. Тобто  $E_B$  визначає ефективне випаровування саме з гіперсолонного Куюльницького лиману; тому окреме чисельне введення  $f(S)$  до  $E_B$  не виконується, щоб уникнути подвійного врахування солонісного ефекту. Солонісна поправка може застосовуватися концептуально при інтерпретації чутливості результатів і при використанні методики для інших років/сценаріїв, коли  $E_0$  оцінюють за гідрометеорологічними даними для прісної води.

Хоча у роботі [7], де було застосовано нестационарну 3D модель Delft3D-FLOW, підкреслена наявність просторово-часової неоднорідності рівня і мінералізації ропи, а також важливість урахування малих водотоків і зливових опадів для моделювання гідрологічного режиму Куюльницького лиману, в запропонованій в роботі інженерній моделі розрахунків дані аспекти не враховуються.

Для визначення об'ємів атмосферних опадів у теплий сезон ( $p$ ) використано відкриті довідкові кліматичні ряди для м. Одеса. За кліматичною нормою (1981–2010 рр.), наведеною у довідкових даних для Одеси [11], місячні суми опадів у теплий сезон становили: травень–вересень становлять відповідно — 36, 49, 47, 39 і 41 мм. Ці значення використано як орієнтир верхньої межі для параметра  $p$  у оптимістичному варіанті. Для додаткової валідації залучено незалежний агрегований кліматичний ресурс [12], який вказує на річну суму опадів для Одеси близько 467 мм та максимум опадів у червні (близько 53 мм).

Так як у цій роботі теплий сезон визначено як друга половина травня–вересень (May(2) → Sep), а холодний — як жовтень–перша половина травня (Oct → May(1)), опади травня поділено порівну між холодним і теплим кроками ( $\frac{1}{2}$  місячної норми). Тобто кліматична норма опадів для теплового сезону (May(2) → Sep) становить близько  $p^{кл} \approx 194$  мм.

Таким чином, якщо визначити середню (у теплий сезон декілька останніх років) ефективну площу дзеркала лиману  $\bar{A} \approx 39,65$  км<sup>2</sup>, то це буде відповідати середньо-кліматичному об'єму опадів на дзеркало лиману за теплий сезон

$$P_B = p \times \bar{A} \approx 7,69 \text{ млн м}^3.$$

Крім кліматичного сценарію опадів при моделюванні також можна також використовувати песимістичний сценарій для теплового сезону (May(2) → Sep) з сумарною сумою опадів ( $p^{пес}$ ) для теплового періоду  $\approx 150$ – $170$  мм. У цьому випадку для  $\bar{A} \approx 39,65$  км<sup>2</sup> поповнення лиману прісною дощовою водою в теплий сезон має складати  $P_B \approx 5,95$ – $6,74$  млн м<sup>3</sup>.

Для оцінки темпів літнього осолонення лиману використано дані випаровування  $E_B = 22,7$  млн м<sup>3</sup> за 2021 р. [2]. За припущенням, що 90 % річного випаровування припадає на теплий сезон, отримуємо  $E_{warm} \approx 20,43$  млн м<sup>3</sup>.

При  $\bar{A} \approx 39,65$  км<sup>2</sup> це відповідає еквівалентній товщині шару випару за теплий сезон  $L_{warm} \approx 0,515$  м. Таким чином, для прийнятої у роботі тривалості теплового сезону (May(2) → Sep,  $\approx 138$  діб) середня інтенсивність випаровування має становити  $\approx 3,73$  мм/добу.

Для холодного періоду (Oct → May(1)) тривалістю  $\approx 227$  діб при прийнятих припущеннях припадає  $E_{cold} \approx 2,27$  млн м<sup>3</sup>, що відпо-

відає середній інтенсивності випаровування  $\approx 0,24$  мм/добу.

За таких темпів випаровування у теплий сезон один цикл роботи майданчика з пониженням рівня від  $h_p = 0,25$  м до  $h_r = 0,02$  м ( $\Delta h \approx 230$  мм) має орієнтовну тривалість  $\approx 62$  доби (без урахування опадів на майданчик та можливого зменшення випару через зростання мінералізації), а два цикли  $\approx 123$  доби, що узгоджується з можливістю двоциклового режиму в межах теплового сезону.

Отримані оцінки використовуються для перевірки узгодженості двосезонного водного балансу. У випадку, коли прийняті у сценарії притоки/втрати не забезпечують відтворення сезонних рівнів/об'ємів, параметри  $p$  та (за потреби)  $E_B$  уточнюються у межах, обґрунтованих спостереженнями та літературними даними.

### Особливості опису стану лиману у двосезонній рекурентній схемі

У запропонованій двосезонній рекурентній схемі стан системи (лиману) на кінець сезону  $k$  описується трійкою змінних:

- об'єм води  $V_k$  (м<sup>3</sup>),
- маса розчинених солей  $M_k$  (т) та
- маса солей у твердому стані (осад/самосад)  $H_k$  (т).

Середня мінералізація ропи в лимані ( $S_k$ ) визначається на кінець сезону  $k$  як

$$S_k = 1000 \times M_k / V_k \quad (\%), \quad (1)$$

де  $M_k$  визначено в тонах,  $V_k$  — у м<sup>3</sup>.

У межах кожного сезону (теплого або холодного) спочатку розраховується спрощений водний баланс:

$$V_2 = V_1 + \sum Q_{in} + P - E, \quad (2)$$

де  $V_2$  — об'єм води у водоймі на кінець розрахункового сезону (м<sup>3</sup>);  $V_1$  — об'єм води на початок сезону (м<sup>3</sup>);  $\sum Q_{in}$  — сума всіх припливів води за сезон (м<sup>3</sup>). Це може включати:

- морський приплив/подачу (каналом, шлюзом тощо),
- річковий/балковий/дренажний стік,
- підземний притік (у цій роботі не враховується),
- інші контрольовані надходження (у цій роботі не враховуються).

Аналогічно розраховується внесення/винос солей в лимані за сезон:

$$M_2^* = M_1 + Q_{\text{sea}} \times S_{\text{sea}} + Q_f \times S_f + P \times S_p, \quad (3)$$

де  $M_2^*$  — розрахункова маса солей у воді на кінець сезону без врахування фазових переходів (випадіння солі в осад або розчинення осаду) і техногенного вилучення ( $\tau$ );  $M_1$  — маса розчинених солей у воді в лимані на початок сезону ( $\tau$ ).

Далі в схемі реалізується оператор осадження солей, який забезпечує їх розділення на розчинену та тверду фази:

$$\begin{aligned} M_2 &= \min(M_2^*, S_{\text{sat}} \times V_2/1000), \\ G_2 &= G_1 + \Delta G. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут  $V_2$  — об'єм води на кінець циклу ( $\text{м}^3$ ),  $G_2$  — маса твердої (осадженої) солі на кінець циклу ( $\tau$ ),  $G_1$  — маса твердої солі на початок циклу ( $\tau$ ). Оператор  $\min(M_2^*, S_{\text{sat}} \times V_2/1000)$  реалізує фізичну умову: розчин не може містити солі більше, ніж допускає насичення:

- якщо  $M_2^* \leq S_{\text{sat}} \times V_2/1000$ : система ненасичена, нічого не випадає, тоді  $M_2 = M_2^*$ .
- якщо  $M_2^* > S_{\text{sat}} \times V_2/1000$ : система перенасичена, «надлишок» солей випадає в осад, тобто  $M_2 = S_{\text{sat}} \times V_2/1000$ , розчин «обрізається» до межі насичення.

$\Delta G$  — приріст твердої фракції солі на дні майданчику, який визначається через  $\max(0, M_2^* - S_{\text{sat}} \times V_2/1000)$  — оператор, який визначає кількість солі, яка додатково випаде в осад за цикл, але лише якщо в кінці кроку система «пересолена» відносно насичення:

- якщо  $M_2^* \leq S_{\text{sat}} \times V_2/1000$ , тобто солей не більше, ніж може бути розчинено при насиченні, тоді різниця від'ємна або нульова, і новий осад не утворюється, тобто приріст твердої солі  $= 0$ .
- якщо  $M_2^* > S_{\text{sat}} \times V_2/1000$ , то «надлишок» солей не може залишатися в розчині і переходить у тверду фазу, тобто цей надлишок додається до  $H_1$ :

$$\Delta G = M_2^* - M_2. \quad (5)$$

Ділення на 1000 забезпечує перехід між одиницями мінералізації в проміле (‰) і кількістю солей в тонах.

Величина  $S_{\text{sat}}$  у межах цієї рекурентної моделі трактується як ефективний поріг початку інтенсивного осадження самосадної солі. Враховуючи польові спостереження, які свідчать, що

активізація самосаду відбувається при мінералізації ропи  $\approx 400$  ‰, у розрахунках прийнято базове значення  $S_{\text{sat}} = 450$  ‰ як компроміс між «порогом появи» та «інтенсивним режимом» осадження.

Експлуатація виділеного в межах лиману майданчику моделюється як додатковий стік осаджених солей ( $G_{\text{harv}}$ ) із системи у вигляді вилучення частини солі  $H_2(1)$ , що утворилася на дні майданчика в межах майданчика наприкінці циклу, після чого тверда фаза в моделі на початку наступного циклу зменшується на величину  $G_{\text{harv}}$ :

$$G_2(2) = G_2(1) - G_{\text{harv}}(\tau). \quad (6)$$

У цьому дослідженні  $S_{\text{sat}}$  застосовується як інтегральний параметр, що відбиває початок ефективного осадження за переважання NaCl у складі самосаду; для числових оцінок використано характерні для Куяльницького лиману значення мінералізації 300–380 ‰ у кінці теплового сезону [3, 6, 9].

#### *Літній режим роботи майданчика та оцінювання впливу ефекту змішування*

Відгороджений майданчик розглянуто як ділянка, що ізолюється на початку теплового сезону ( $\text{May}(2)$ ) за максимальної водності.

У роботі передбачається, що робота майданчика умовною площею  $A_p = 10$  га (100 тис.  $\text{м}^2$ ) по вилученню самосадної солі в теплому сезоні здійснюється у два цикли. У кожному циклі випаровування знижує глибину ропи на майданчику до умовних  $h_r = 0,02$  м (що відповідає залишковому об'єму ропи  $V_r = A_p \cdot h_r \approx 0,002$  млн  $\text{м}^3$ ) після чого майданчик знову поповнюється ропою з основної акваторії через відкритий прохід до вирівнювання рівнів. Фільтраційними/інфільтраційними втратами ропи через огорожувальні вали в задачі нехтуємо.

Оскільки випаровування не вилучає розчинені солі, солоність у майданчику зростає до моменту насичення (також можливий тимчасовий ефект перенасичення, однак після початку утворення твердої фракції солоність зменшується до значення насичення), а подальше випаровування призводить до випадіння солей у твердий осад. Після збору практично всього самосаду солі (тобто в задачі вважається, що тверда фаза вилучається з системи); а ропа, що залишилась у

майданчику, при відкритті проходу змішується з основною масою води в лимані (рис. 2).

Через те, що майданчик ізольований від основної частини лиману, як правило, він досягає порогу осадження раніше, ніж основна акваторія, оскільки в нього не надходять додаткові літні розсолонючі притоки (поверхневий стік, локальні підживлення), тоді як випаровування здійснюється з поверхні як майданчику, так й основної частини лиману з однаковою швидкістю. Вважається, що зменшення швидкості випаровування з ростом солоності [1] може лише частково компенсувати це випередження, але не змінює його знак.

Таким чином, ефект майданчику для збору самосадної солі в моделі полягає у вилученні у теплий сезон певної кількості солі, що надходять за рік до системи з двох резервуарів (основної частини лиману та відокремленого майданчику). Після першого циклу збору самосадної солі у майданчику змішування об'ємів ропи основної частини лиману та відокремленого майданчику працює як притік у майданчик розчиненої у воді солі, яка у кінці другого циклу також вилучається на майданчику у вигляді «твердої самосадної солі».

Вплив експлуатації відгородженого майданчика на сольовий баланс оцінюється через величину техногенного вилучення самосадної солі  $G_{\text{harv}}(t)$  та співвідношення загальної річної кількості вилученої з майданчику самосадної солі ( $G_{\text{year}}$ ) зі зовнішніми надходженнями солей у лиман. У сезонній рекурентній постановці  $G_{\text{harv}}(t)$  входить у рівняння (4) для «резервуара твердої солі» як член, що безпосередньо зменшує загальний запас осаджених солей у системі  $G_s$ :

$$G_s(t+1) = G_s(t) + \Delta G(t) - D(t) - G_{\text{harv}}(t). \quad (7)$$

Тут:

$G_s(t)$  — маса твердої солі (самосад/осад) на початок циклу;  $G_s(t+1)$  — маса твердої солі на кінець циклу.

$\Delta G(t)$  — приріст твердої фази впродовж циклу (кристалізація/осадження) внаслідок перенасичення розчину у термінах рівняння (4).

$D(t)$  — розчинення твердих солей назад у ропу при розбавленні; у такому сценарії для майданчика припускається  $D(t) \approx 0$ , оскільки вилучення самосаду виконується одразу після досягнення/перевищення  $S_{\text{sat}}$ .

$G_{\text{harv}}(t)$  — кероване техногенне вилучення твердої солі (збір самосаду з дна майданчика) у термінах рівняння (6).

Максимальне вилучення солі за один цикл/крок ( $G_{\text{cycle}}$ ) оцінюється за формулою:

$$G_{\text{cycle}} \approx S_f \times V_0 - S_{\text{sat}} \times V_r. \quad (8)$$

Тут:

$S_f$  — стартова мінералізація ропи в майданчику на початку відповідного циклу.

Для 1-го циклу приймаємо  $S_{f_1} = S_L(\text{May})$  (мінералізація основної акваторії в момент ізоляції, тобто 200 ‰). Для 2-го циклу  $S_{f_2}$  визначається змішуванням залишкової ропи у майданчику ( $V_r$  з мінералізацією, близькою до  $S_{\text{sat}}$  після кристалізації) та порції ропи, що надходить з лиману при поповненні ( $V_0 - V_r$ ):

$$S_{f_2} = (V_r \times S_{\text{sat}} + (V_0 - V_r) \times S_L(\text{mid})) / V_0. \quad (9)$$

Тут:

$S_L(\text{mid})$  — мінералізація ропи в основній акваторії на момент поповнення між циклами.

$V_0$  — об'єм ропи на початку кожного циклу в ізольованому майданчику (повне заповнення до робочої глибини). У такому сценарії  $V_0 = 0,025$  млн м<sup>3</sup>.

Добуток ( $V_r \times S_{\text{sat}}$ ) — це маса солей, що залишається розчиною у залишковому об'ємі ропи при досягненні порога насичення ( $V_r = A_p \times h_r$ ; у такому сценарії  $V_r = 0,002$  млн м<sup>3</sup>). Цю частину солей не можна вилучити як тверду фазу, оскільки вона залишається в розчині у залишковому шарі рідини.

У формулі (9) розглядається така схема змішування ропи майданчику та ропи лиману перед початком 2-го циклу. Після завершення 1-го циклу і вилучення самосадної солі майданчик залишається заповненим залишковим об'ємом  $V_r$  з високою солоністю, яку у спрощеній схемі приймаємо близькою до порога насичення  $S_{\text{sat}}$ . Далі майданчик поповнюється ропою з основної акваторії через відкритий прохід до вирівнювання рівнів; при цьому об'єм поповнення дорівнює ( $V_0 - V_r$ ), а його мінералізація приймається рівною солоності лиману в момент поповнення  $S_L(\text{mid})$ . Припускається швидке перемішування у межах майданчика (однорідність за солоністю в кінці поповнення) і відсутність істотного розчинення осаду після збору ( $D \approx 0$  для кроку «вилучення → поповнення»). За цих припущень

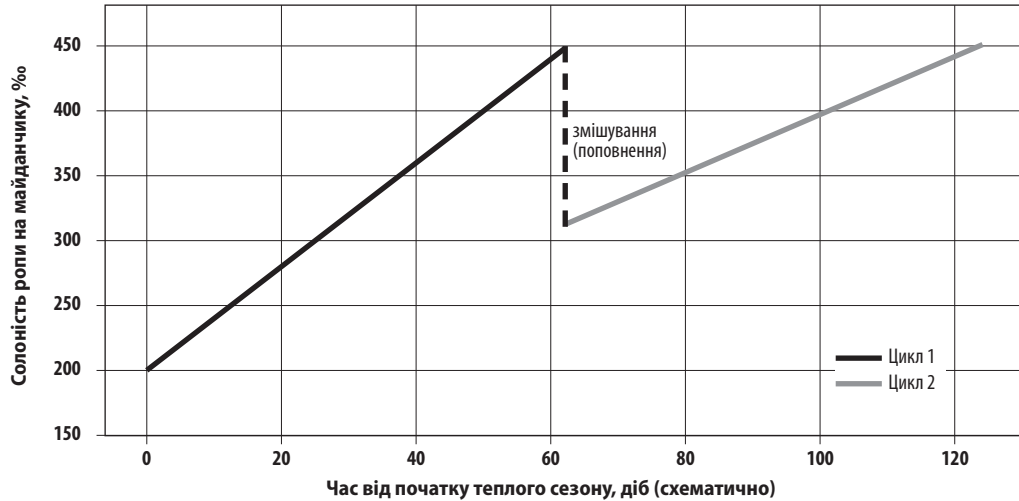


Рис. 2. Динаміка мінералізації ропи на майданчику в 2-х циклах (підвищення до порога насичення  $S_{\text{sat}} = 450$  ‰) і момент змішування/поповнення між циклами

стартова мінералізація 2-го циклу визначається як масово-об'ємне середнє.

Ця формула відображає, що навіть при «повному заповненні» до  $V_0$  на початку 2-го циклу стартова мінералізація у майданчику завжди є вищою за  $S_L(\text{mid})$  через домішку залишкової концентрованої ропи об'ємом  $V_r$ .

Розрахунок  $S_L(\text{mid})$  виконується сезонно-усередненою box-моделлю, застосованою до основної акваторії лиману в межах теплого сезону між контрольними моментами  $\text{May}(2) \rightarrow T_{\text{mid}}$ . Час  $T_{\text{mid}}$  відповідає моменту завершення 1-го циклу роботи майданчика (після доведення ропи до порога насичення та вилучення самосаду), перед його поповненням. Тривалість 1-го циклу  $t_{\text{cycle}}$  оцінюється з водного балансу майданчика як час, необхідний для випару шару  $\Delta h = h_p - h_r$ , використовуючи середню інтенсивність випаровування теплого сезону (за даними 2021 р. та/або кліматичних норм). Далі припускаємо, що сезонні потоки для основної акваторії ( $E$ ,  $P$  та надходження прісної води) на відріжку  $\text{May} \rightarrow T_{\text{mid}}$  пропорційні частці часу  $f = t_{\text{cycle}}/T_{\text{warm}}$  (де  $T_{\text{warm}}$  — тривалість теплого сезону за прийнятою сезонною схемою). Тоді для основної акваторії лиману маємо:

$$\begin{aligned} V_{\text{mid}} &= V_{\text{May}} + \\ & f \times \left( \sum Q_{\text{in,warm}} + P_{\text{warm}} - E_{\text{warm}} \right), \\ M_{\text{mid}}^* &= M_{\text{May}} + \\ & f \times \left( \sum Q_{\text{in,warm}} \times S_{\text{in}} + P_{\text{warm}} \times S_p \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Оскільки протягом 1-го циклу у вибраному сценарії в основній акваторії лиману поріг  $S_{\text{sat}}$  не досягається, фазовий перехід «розчин  $\rightarrow$  тверда фаза» для цього резервуара не активується, і тоді

$$S_L(\text{mid}) = 1000 \times M_{\text{mid}}^* / V_{\text{mid}}. \quad (11)$$

Саме це значення підставляється у формулу змішування для  $S_{f_2}$ .

#### Оцінювання ймовірних масштабів вилучення самосадної солі в теплий сезон та його впливу на сольовий режим лиману

Як вже вказувалося вище, контрольоване вилучення самосадної солі розглядається як один із потенційних інструментів управління сольовим балансом Куяльницького лиману [1, 6]. Застосуємо розроблену модель для оцінювання ймовірних масштабів вилучення самосадної солі в теплий сезон та його впливу на сольовий режим лиману. Узагальнені дані щодо вхідних параметрів та припущень, використаних при розрахунках, наведені у *табл. 1*.

Якщо припустити, що висота стовпчика ропи в лимані на початок теплого сезону  $h_{\text{May}} = 0,5$  м та мінералізація ропи лиману на початку теплого сезону  $S_L(\text{May}) = 200$  ‰, при кліматичній нормі опадів ( $P_B \approx 7,69$  млн  $\text{m}^3$ ), отримуємо за сезонною рекурентною моделлю

$$S_L(\text{mid}) \approx 293,6 \text{ ‰}.$$

За таких умов мінералізація ропи у майданчику на початку 2-го циклу роботи має становити  $S_{f_2} \approx 306,1$  ‰. Слід підкреслити, що розра-

Таблиця 1. Використані при розрахунках вхідні параметри моделі та припущення

Параметр	Значення	Джерело / обґрунтування
Ефективна площа дзеркала лиману у теплий сезон ( $\bar{A}$ )	$\approx 39,65 \text{ км}^2$	Узгодження з річним усередненням для 2021 р. [2] і даними [8–10] з урахуванням літнього підсихання лиману
Річне випаровування з водної поверхні лиману ( $E_b$ )	22,7 млн $\text{м}^3$	За матеріалами комплексного обстеження 2021 р. [2]
Частка випаровування, що припадає на теплий сезон	90 %	Припущення, яке узгоджується з розрахунками, наведеними в [1]
Тривалість теплого сезону (May(2) – Sep)	$\approx 138$ діб	Припущення, яке узгоджується в цілому з кліматичними даними
Об'єм дощової води, що надійшов на дзеркало лиману за теплий сезон ( $P_B$ )	Кліматична норма $\approx 7,69$ млн $\text{м}^3$ Посушливі умови $\approx 5,95$ – $6,74$ млн $\text{м}^3$	Кліматичні дані
Об'єм морської води, що надійшов за рік до лиману, $Q_{\text{sea}}$ та її мінералізація, $S_{\text{sea}}$	$\approx 10,2$ млн $\text{м}^3$ та $\approx 13\%$ , відповідно	За матеріалами комплексного обстеження 2021 р. [2]
Об'єм стоку з водозбору, $Q_f$ та його мінералізація, $S_f$	10 млн $\text{м}^3$ та 2 % відповідно	За матеріалами комплексного обстеження 2021 р. [2]
Солоність основної акваторії на початку теплого сезону $S_L(\text{May})$	200 ‰	Припущення, що базується на польових дослідженнях
Висота стовпчику ропи в лимані на початок теплого сезону ( $h_{\text{May}}$ )	0,5 м	Припущення, що базується на даних багаторічних досліджень
Площа відгородженого майданчика — «резервуара твердої солі», $A_p$	10 га	Припущення початкової площі експериментального майданчику
Початковий та кінцевий рівні стовпчику ропи у відгородженому майданчику $h_p$ та $h_f$	0,25 м та 0,02 м відповідно	Припущення, що базується на польових дослідженнях
Ефективний поріг мінералізації ропи, при досягненні якого починається інтенсивне осадження самосадної солі, $S_{\text{sat}}$	450 ‰	Припущення, що базується на польових дослідженнях
Інтенсивність розчинення твердих солей назад у ропу для кроку «вилучення → поповнення» (D)	$\approx 0$ тон	Інтенсивність розчинення твердого осаду при мінералізації ропи після змішування більше 300 ‰ дуже низька

хунки свідчать про суттєву чутливість величини  $S_{f_2}$  до вибраного значення середньої глибини лиману на початку літнього сезону. Так, якщо:

$$h_{\text{May}} = 0,70 \text{ м} \rightarrow S_{f_2} \approx 267,4 \text{ ‰},$$

$$h_{\text{May}} = 0,40 \text{ м} \rightarrow S_{f_2} \approx 322,9 \text{ ‰}.$$

У посушливі роки при  $P_B \approx 5,95$ – $6,74$  млн  $\text{м}^3$  мінералізація ропи в лимані на початку другого циклу роботи майданчика  $S_L(\text{mid})$  має складати від 304,0 ‰ (при  $p^{\text{пес}} \approx 170$  мм) до 313,6 ‰ (при  $p^{\text{пес}} \approx 150$  мм). Тому у подальших оціночних розрахунках будемо використовувати базове значення  $S_L(\text{mid}) = 300$  ‰, що відповідає

значенню мінералізації ропи у майданчику на початку 2-го циклу роботи  $S_{f_2} = 312$  ‰.

Виконані за описаною методикою розрахунки при заданих вхідних параметрах (див. **табл. 1**) свідчать, що сумарне максимально можливе вилучення самосадної солі з майданчика ( $G_{\text{warm}}$ ) за 2 цикли його роботи у теплий сезон (May(2) → Sep)

$$G_{\text{warm}} = G_{\text{cycle}}(1) + G_{\text{cycle}}(2), \quad (12)$$

оцінюється приблизно в 11,0 тис. тон (4100 т + 6900 т).

Для порівняння, у вибраному сценарії річне зовнішнє надходження солей (за умови надхо-

дження до лиману за рік 10 млн м<sup>3</sup> морської води солоністю 13 ‰ та 10 млн м<sup>3</sup> слабосоленої прісної води солоністю 2 ‰ з поверхневих джерел) становить близько 150 тис. т солей на рік.

Величина  $G_{\text{warm}}$  є чутливою до вибору порога насичення  $S_{\text{sat}}$  та мінералізації основної акваторії лиману в момент поповнення між циклами  $S_L(\text{mid})$ . Отже наведена оцінка має інтерпретуватися як орієнтовна для порівняння з річним зовнішнім надходженням солей і для попередньої перевірки сценаріїв керованого вилучення.

### Висновки

Застосування запропонованої двосезонної рекурентної моделі водно-сольового балансу Куяльницького лиману з явним обліком твердих солей для кількісної оцінювання внеску керованого вилучення самосадної солі дозволяє зробити такі висновки:

- Природні кліматичні умови Куяльницького лиману дозволяють реалізувати експлуатаційну схему роботи відокремленого майданчику: у теплий сезон майданчик може працювати у 2 цикли: «заповнення → випаровування/кристалізація → збір солі → відкриття проходу до вирівнювання рівнів».

- У вибраному сценарії річне зовнішнє надходження солей (за умови надходження до лиману за рік 10 млн м<sup>3</sup> морської води солоністю 12 ‰ та 10 млн м<sup>3</sup> слабосоленої прісної води солоністю 2 ‰) вилучення самосадної солі з відокремленого майданчику площею 10 га може лише частково (в межах 6–10 %) компенсувати притік солей. Цей ефект накопичувальний і проявляється в багаторічному масштабі. При середньорічній солоності ропи в лимані приблизно 260 ‰ ефект вилучення самосадної солі на відокремленому майданчику площею 10 га може призвести до зниження середньорічної солоності лиману на 0,2 %.

- У разі успішної реалізації проекту видалення самосадної солі з лиману з метою зниження його середньої солоності можливо розглянути масштабування (площа майданчика/майданчиків до 100–200 га), що може наблизити очікувану компенсацію річного притоку солей до 100 %.

- У цілому, вилучення самосадної солі з відокремленого майданчика(-ків) доцільно розглядати як один з можливих реальних елементів довгострокової стратегії підтримання сприятливого водно-сольового режиму лиману. Однак це не відмінняє науково обґрунтованого висновку про те, що поповнення Куяльницького лиману морською водою є вимушеним тимчасовим заходом. Водночас головним механізмом довгострокової стратегії підтримання сприятливого водно-сольового режиму лиману має бути відновлення джерел поповнення Куяльницького лиману прісною водою в обсягах не менше ніж 15 млн м<sup>3</sup> за рік.

- Жорстке дотримання екологічних вимог має критичне значення для реалізації проекту, так як майданчик та підходи до нього знаходяться в межах території природно-заповідного фонду (Національний природний парк «Куяльницький») і першої зони санітарної охорони курорту державного значення «Куяльницький лиман», тому технології збору та вивезення самосадної солі з майданчика мають забезпечити відсутність/допустиме техногенне навантаження на унікальну екосистему лиману та прибережних територій.

### Новизна дослідження

Новизна роботи полягає у застосуванні сезонно-усередненої рекурентної балансової box-моделі з явним обліком «резервуара твердої солі» для кількісної оцінювання внеску керованого вилучення самосадної солі на ізольованому майданчику (10 га) у зміну сольового балансу та середньої солоності основної акваторії Куяльницького лиману.

### References [Література]

1. Loboda, N. S., & Hopchenko, Ye. D. (2016). *Water Regime and Hydroecological Characteristics of the Kuyalnyk Estuary*. Monograph. TES, Odesa, 332. [In Ukrainian]. [Лобода Н. С., Гопченко Є. Д. *Водний режим та гідроекологічні характеристики Куяльницького лиману*: моногр. Одеський держ. екологічн. ун-т. Одеса: ТЕС, 2016. 332 с.]
2. Tychkovenko, Yu. S., Harkusha, O. P., & Hryb, O. M. (2022). Results of hydrological, hydrochemical, hydrobiological, and medico-biological survey of the Kuyalnyk Estuary. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 30, 40–64. [In Ukrainian]. [Тучковенко Ю. С., Гаркуша О. П., Грїб О. М. та ін. (2022). Результати гідрологічного, гідрохімічного, гідробіологічного та медико-біологічного обстеження Куяльницького лиману. *Український гідрометеорологічний журнал*, (30), 40–64.]. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.30.2022.04>.

3. Shikhaleeva, G. M., Yurchenko, Yu. Yu., & Kiryushkina, G. M. (2023). The history of research and status of study of hyperhaline Kuyalnyk Estuary geoecosystem (Ukraine, North-Western Black Sea). *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"*, 15–25. [In Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-02>.
4. Stepanenko, S. N. (2013). *Causes of the Shallowing of the Kuyalnyk Estuary and Ways to Save It*. Odesa. Ekologiya, 36. [In Russian]. [Степаненко С. Н. (2013). *Причини обмеления Куяльницького лимана и пути его спасения*. 2013. Одесса: Экология, 36 с.].
5. Hryb, O. M. (2015). Scientific substantiation and practical implementation of measures for managing the hydroecological regime of the Kuyalnyk Estuary based on modeling the water–salt balance of the water body under global climate change. *Scientific Notes of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series "Biology."* 3–4 (64), 130–133. [In Ukrainian]. [Гриб О. М. (2015). Наукове обґрунтування та практична реалізація заходів по управлінню гідроекологічним режимом Куяльницького лиману на основі моделювання водно-сольового балансу водойми в умовах змін глобального клімату. *Наук. записки Тернопільського пед. університету. Серія «Біологія»*, № 3–4 (64), 130–133.].
6. Adobovskiy, V. V., & Bohatova, Yu. I. (2013). Features of the modern hydrological and hydrochemical regime of the Kuyalnyk Estuary and a predictive assessment of its components under possible replenishment of the water body with seawater and freshwater. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 13, 127–137. [In Russian]. [Адобовский В. В., Богатова Ю. И. (2013). Особенности современного гидролого-гидрохимического режима Куяльницького лимана и прогнозная оценка его составляющих в условиях возможного пополнения водоема морскими и пресными водами. *Український гідрометеорологічний журнал*. № 13. 127–137.].
7. Tuchkovenko, Yu. S., & Kushnir, D. V. (2016). Results of numerical modeling of intra-annual variability of hydrological regime characteristics of the Kuyalnyk Estuary. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 17. 137–149. [In Ukrainian]. [Тучковенко Ю. С., Кушнір Д. В. (2016). Результати чисельного моделювання внутрішньорічної мінливості характеристик гідрологічного режиму Куяльницького лиману. *Український гідрометеорологічний журнал*. 17. 137–149.]. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.15>.
8. Diatlov, S. E., Koshelev, A. V., Zaporozhets, S. A., & Lukianova, E. A. (2018). Odesa estuaries: current state and prospects for their use and protection. *Water: Hygiene and Ecology*. 1–4 (6). 62–68. [In Russian]. [Дятлов С. Е., Кошелев А. В., Запорожец С. А., Лукьянова, Е. А. (2018). Одесские лиманы: современное состояние и перспективы их использования и охраны. *Вода: Гигиена і екологія*. 1–4 (6). 62–68.].
9. Yennan, A. A., Dubyna, D. V., Tsarenko, P. M., et al. (2018). How to restore the ecosystem of the Kuyalnyk Estuary. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 6. 93–109. [In Ukrainian]. [Еннан, А. А., Дубина Д. В., Царенко П. М. та ін. (2018). Як відновити екосистему Куяльницького лиману. *Вісник НАН України*. 6. 93–109.]. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2018.06.093>.
10. Rozengurt, M. Sh. (1974). *Hydrology and Prospects for the Reconstruction of Natural Resources of the Odesa Estuaries*. Naukova Dumka, Kyiv, 225. [In Russian]. [Розенгурт М. Ш. (1974). *Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов Одесских лиманов*. Киев: Наукова думка. 225 с.]. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.15>.
11. *Climate of Odesa*. Wikipedia (climate normal of precipitation, 1981–2010). [In Ukrainian]. [Клімат Одеси. Вікіпедія. (Кліматична норма опадів 1981–2010). URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Клімат\\_Одеси](https://uk.wikipedia.org/wiki/Клімат_Одеси) (accessed: 12.13.2025).
12. *Copernicus Climate Data Store. ERA5-Land monthly means*. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means> (accessed: 12. 23.2025).

Стаття надійшла до редакції 03.02.2026 р., прийнята до друку 26.02.2026 р.

Stepanenko, S. M.

 0000-0002-6343-3968

Institute of Market and Economic and Ecological Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Odesa

## On the Impact on the Water-Salt Regime of the Kuyalnyk Estuary of Restoring Controlled Harvesting of Self-Deposited Salt on an Isolated Platform

UDC 502.4:528.94(477.4)(292.485)(045)

The paper provides a quantitative assessment of the potential impact of operating an isolated salt-harvesting platform on the water–salt regime of the Kuyalnyk Estuary (Odesa region, Ukraine). A season (May–Oct) recurrent water–salt balance model with an explicit solid-salt reservoir was developed and parameterized using available observational data. The 10 ha platform is treated as a local evaporator (working depth 0,25 m) operated in two summer cycles; in each cycle the water level is lowered by  $h_r = 0,02$  m due to evaporation and then replenished with brine from the main basin through an open passage until levels equalize. Under the adopted scenario, the annual salt removal is  $\sim 11,0$  kt, translating into an average salinity decrease of  $\sim 0.2\text{‰}$  per year for the main water body given a cold-season seawater inflow of  $\sim 10$  million  $\text{m}^3$ . Post-cycle mixing does not, by itself, desali-

nate the estuary; the net effect is driven by removing precipitated solids. Practical recommendations for seasonal operation and risk minimization are proposed.

**Keywords:** *Kuyalnyk Estuary; water balance; salt balance; hypersaline waters; evaporative salt precipitation; recurrent model; management.*

---

**For citation:**

Stepanenko, S. M. (2026). On the impact on the water-salt regime of the Kuyalnyk Estuary of restoring controlled harvesting of self-deposited salt on an isolated platform. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 8–18. [In Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2026.01.008>

**Copyright** © 2026 Publishing House *Akadempyodyka* of the National Academy of Sciences of Ukraine.



The article is published under the open access license CC BY-NC-ND license

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>