

УДК 551.468.4

## МОДЕЛЮВАННЯ МІНЛИВОСТІ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОЙМИ САСИК ЗА РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ЇЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Д. В. Кушнір, Ю. С. Тучковенко

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [dkush@ukr.net](mailto:dkush@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

В роботі висвітлено результати адаптації до умов водоймища Сасик та верифікації чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D Flexible Mesh (FM), а також застосування цієї моделі для оцінки очікуваної просторово-часової мінливості солоності вод у водоймі після її ренатуралізації в морський лиман шляхом встановлення постійного водообміну лиману з морем через штучний з'єднувальний канал.

Наприкінці 70-х років ХХ століття морський лиман Сасик був відокремлений від моря і перетворений у прісноводне водосховище. Однак, через низькі показники якості вод водосховища у сучасний період особливої актуальності набуло вирішення задачі повернення водоймі первісного статусу морського лиману, тобто її ренатуралізації.

Отримані результати моделювання мінливості гідрологічних характеристик водосховища Сасик за умов 2019 року свідчать про можливість застосування гідротермодинамічної моделі для оцінки ефективності та можливих наслідків прийняття різних сценарних рішень щодо управління гідрологічним режимом водойми при різних варіантах її експлуатації.

Моделювання Delft3D FM була використана для оцінювання часу водооновлення лиману Сасик морськими водами, а також характеру коливань солоності його вод після відновлення зв'язку з морем через штучно створений у пересипу сполучний канал «море-лимани» шириною 100 м та глибиною 1,5 м. Сценарне моделювання виконувалося за гідрометеорологічних умов 2019 року для двох послідовних років. В перший рік моделювання розглядався варіант водного менеджменту, коли надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» відсутнє, а канал «море-лимани» відкритий протягом року. В другий рік моделювання за початкові умови приймалися результати розрахунків на кінець першого року, а зовнішній вплив в моделі залишався незмінним. Для другого року розрахунків додатково розглядався варіант надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» протягом травня-липня.

За результатами моделювання встановлено, що у разі забезпечення протягом року постійного водообміну лиману з морем через з'єднувальний канал «море-лимани» (із вказаними морфометричними характеристиками) і відсутності надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик»: 1) час повного водооновлення лиману складе 1 рік і 5 місяців; 2) стабілізація солоності вод в лимані не відбудеться, тобто в багаторічній перспективі буде відбуватись засолення вод лиману; 3) проміжок часу з моменту початку водообміну з морем, протягом якого буде досягнута критична для існування прісноводних видів флори і фауни межа 7-8‰ солоності вод в лимані, складає для південної частини лиману приблизно 4 місяці, а для північної – 5,5 місяців; після цього почнеться формування морської екосистеми водоймища.

Показано, що стабілізація солоності вод у лимані в другий рік моделювання може бути досягнута у разі забезпечення надходження до лиману дунайських вод протягом періоду, коли відмітки рівня води в р. Дунай значно перевищували відмітки рівня води в лимані (травень-липень 2019 р.).

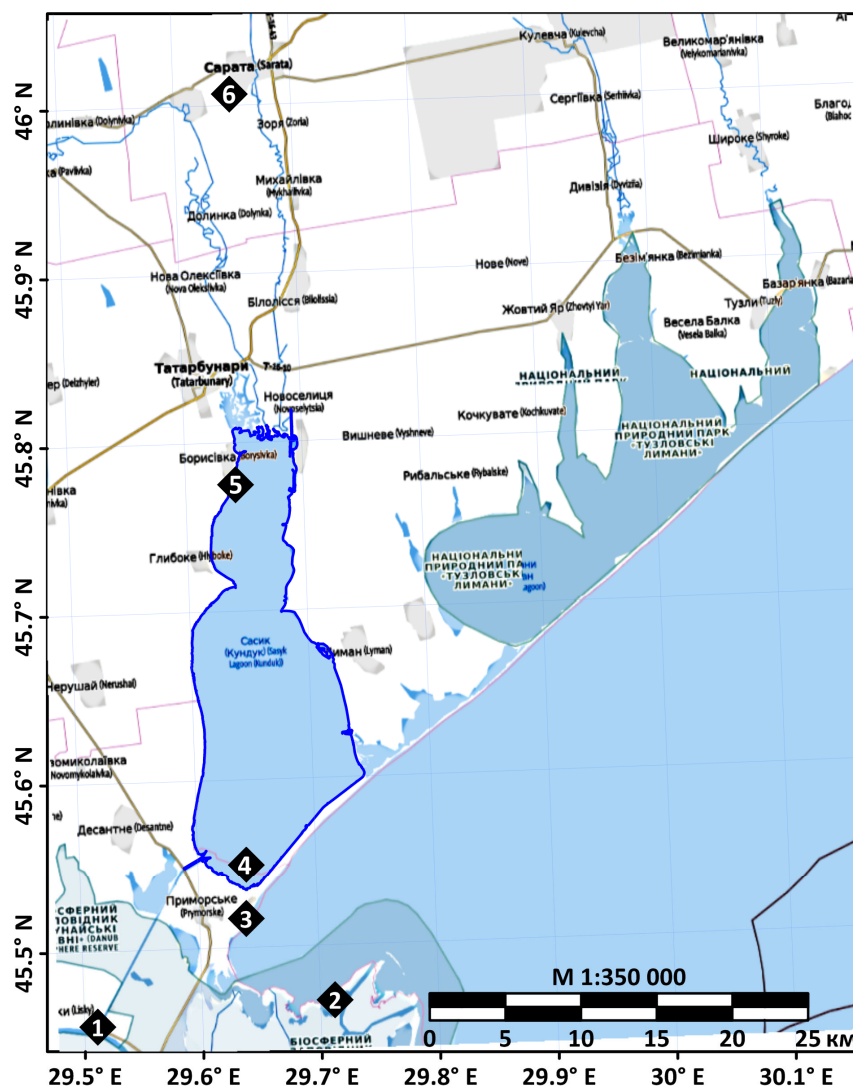
**Ключові слова:** лиман Сасик, ренатуралізація, гідрологічні характеристики, моделювання, верифікація, водообмін з морем

### 1. ВСТУП

Водосховище Сасик розташоване на півдні Одеської області (29,653 сх.д., 45,666 пн.ш.), поблизу від дельти р. Дунай (рис. 1). При відмітці рівня води у водоймі 0 м БС площа його акваторії становить близько 210 км<sup>2</sup>. Довжина водо-

йми з півночі на південь складає 29 км, а ширина змінюється від 3 до 12 км. Максимальна глибина у водосховищі досягає 3 м. В північну частину лиману в окремі місяці року надходить стік річок Когильник та Сарата.

До кінця 70-х років ХХ ст. водосховище Сасик являло собою напівзакритий лиман, водооб-



**Рис. 1** – Схема розташування водойми Сасик в межах Татарбунарського та Кілійського районів Одеської області: 1 – головний шлюз водопропуску «Дунай-Сасик»; 2 – морський гідрологічний пост «Усть-Дунайськ»; 3 – морський гідрологічний пост «Приморське»; 4 – контрольна точка для аналізу результатів моделювання у південній частині лиману; 5 – гідрологічний пост у с. Борисівка; 6 – ГМС «Сарата» (WMO ID=33896)

**Fig. 1** – Map showing the location of the Sasyk Reservoir within the boundaries of Tatarbuniar and Kiliya districts of Odessa Region: 1 – main sluice of the “Danube-Sasyk” flume line; 2 – “Ust-Dunaysk” gaging station; 3 – “Prymorske” gaging station; 4 – observation point in the southern part of the lagoon for model results analysis; 5 – gaging station near Borysivka village; 6 – “Sarata” hydrometeorological station (WMO ID=33896)

мін якого з морем відбувався епізодично за рахунок утворення тимчасових прірв у піщаному пересипу, який відокремлює водойму від Жебриянівської затоки північно-західної частини Чорного моря. Періодичність утворення та діяльності прірв регулювалася природними чинниками: змінами рівнів моря та лиману, впливом штормів з боку моря на піщаний пересип. Прірви утворювались в період сильних штормів восени та навесні і могли існувати протягом багатьох років [1, 2]. Так, за свідченням [1], в період з 1958 до 1971 роки лиман сполучався з морем

через Кундуцьку прірву, розташовану в центральній частині пересипу. В 1958 р. пересип лиману був розмитий під час весіннього шторму в місці розташування цієї прірви на ділянці протяжністю 3 км. В [3] згадується про промоїну Вовчек, шириною 100-300 м і глибиною 3-5 м, яка проіснувала декілька років.

В той же час відомо, що з 1947 по 1950 роки більшу частину часу зв'язок з морем був відсутній, а в 1946 та 1951-1952 роках – в основному наявний [2].

Мінералізація вод лиману Сасик з кінця ХІХ до першої половини ХХ ст. коливалась у межах 12-28 г/л, з максимальними значеннями в періоди ізоляції лиману від моря [4]. З 1958 р., коли зв'язок лиману з морем здійснювався через Кундуцьку прірву, мінералізація води змінювалась від 2 г/дм<sup>3</sup> у верхів'ях лиману до 18 г/дм<sup>3</sup> на прилеглих до пересипу ділянках акваторії.

У 1978 році, в результаті реалізації проекту створення Дунай-Дністровської зрошувальної системи, лиман Сасик був відокремлений від моря шляхом розширення та укріплення піщаного морського пересипу, по якому було прокладено автодорогу. Разом з цим, лиман був з'єднаний з р. Дунай штучним каналом загальною довжиною близько 13,5 км, обладнаним системою пропускних шлюзів та рибозагороджувальних споруд. Тобто лиман був штучно перетворений у водосховище [5, 6].

У теперішній час водойма не функціонує в якості, передбаченого проектом водогосподарського комплексу, прісноводного водосховища через незадовільні показники якості його вод (високий рівень мінералізації, перевищення вмісту хлоридів, сульфатів, забруднення важкими металами, фенолами, пестицидами). Вода Сасика непридатна як для забезпечення комунально-побутових потреб і питного водопостачання населенню, так і для зрошення земель [4-7]. Через значне зниження якості рибних ресурсів в результаті погіршення загального санітарно-гігієнічного стану водойми в умовах слабкого водообміну, ефективне використання вдсх. Сасик в рибогосподарських цілях також є проблематичним. До основних гідроекологічних проблем водосховища відносяться також підвищений рівень евтрофікації його вод, цвітіння синьо-зелених водоростей, постійне занесення каналу «Дунай-Сасик» та поступове обміління через відкладення зважених наносів, що надходять з дунайськими водами, у південній частині водоймища.

В цілому, стан екосистеми водосховища на сучасному етапі можна охарактеризувати як напружений і нестабільний, тобто як стан екосистеми штучної водойми, який має обмежені можливості для саморегулювання і залежить, головним чином, від зовнішніх чинників.

Незадовільний екологічний стан вдсх. Сасик і нераціональне використання його природних ресурсів призводять до виникнення соціальної напруженості в регіоні. З метою попередження негативних санітарно-епідеміологічних ризиків та вирішення низки екологічних, соціальних та економічних проблем, які пов'язані з подальшим

використанням водойми Сасик як водосховища, та реалізації прав місцевих громад на безпечне довкілля, Одеською обласною радою було прийнято рішення від 30.10.2015 р. № 1454-VI «Про відновлення екосистеми морського лиману Сасик та реабілітацію прилеглих територій». В цьому рішенні визначається необхідність відновлення природної екосистеми (ренатуралізації) морського лиману Сасик шляхом забезпечення вільного водообміну між ним і морем через штучний з'єднувальний канал (або канали).

Вирішення проблеми повернення водоймі Сасик природного статусу «лиману» повинне ґрунтуватися на детальних науково-обґрунтованих інженерних рішеннях для запобігання виникненню непередбачуваних негативних екологічних і соціально-економічних наслідків, в тому числі зайвих ресурсних і фінансових втрат. Серед інших, повинні бути надані обґрунтовані відповіді на наступні питання:

- визначення оптимальної кількості, морфометричних характеристик (ширина, глибина) та місць розташування каналів (каналів), які з'єднують водойму з морем для забезпечення максимального водооновлення лиману морськими водами;
- визначення кратності водооновлення водойми морськими водами у обраному варіанті та режимі експлуатації каналу (каналів);
- визначення: оптимального режиму та умов надходження морських вод до водойми в період перетворення прісноводної екосистеми в морську; необхідних заходів щодо мінімізації негативних гідроекологічних наслідків цього процесу; часу необхідного для розвитку та сталого функціонування морської екосистеми;
- оцінка очікуваних гідроекологічних характеристик лиману в умовах оптимального функціонування з'єднувального каналу (каналів), зокрема, просторово-часової мінливості солоності води;
- оцінка інтенсивності занесення каналу (каналів) піском з боку моря та витрат на підтримання його в робочому, передбаченому проектом стані; обґрунтування необхідності будівництва гідротехнічних споруд для зменшення постійних витрат коштів на розчищення каналу та забезпечення його (їх) безперервної роботи.

Вирішення визначених вище задач може бути забезпечено застосуванням сучасних чисельних математичних моделей.

Мета роботи полягає у викладенні результатів адаптації до умов водоймища Сасик та верифі-

кації чисельної гідродинамічної моделі Delft3D Flexible Mesh, а також у проведенні попередньої оцінки очікуваної просторово-часової мінливості солоності вод лиману після встановлення режиму постійного водообміну лиману з морем.

Особливості стаціонарної вітрової циркуляції вод в лимані Сасик, за результатами моделювання із використанням методу повних потоків, вперше обговорювались в роботі [8]. Задача визначення на підставі результатів чисельного гідродинамічного моделювання оптимальних розмірів прірви, які у разі ренатуралізації вдсх. Сасик у морський лиман забезпечать необхідну інтенсивність водообміну між лиманом і морем, вирішувалась раніше в роботі [9].

Однак за роки, які пройшли з моменту виходу вищезгаданих робіт, методи чисельного моделювання і моделі гідрофізичних та гідродинамічних процесів зазнали суттєвого розвитку. Ні в яке порівняння не йдуть розрахункові потужності сучасних комп'ютерів, і тих, що були доступні дослідникам на початку 90-х років ХХ ст. Зазнали змін характеристики мінливості гідрометеорологічних процесів та розподіл глибин у водоймі. Тому перевірка, уточнення і доповнення [8, 9] результатами розрахунків, отриманими із застосуванням сучасних чисельних 3-D гідродинамічних моделей, також є актуальною задачею.

## 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для вирішення поставленої задачі застосовувалась чисельна гідротермодинамічна модель Delft3D Flexible Mesh (Delft3D FM) у 3D-варіанті [10]. Модель заснована на чисельному вирішенні тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини на мілкій воді у наближенні Бусінеска та гідростатики. Система прогностичних диференціальних рівнянь моделі складається з рівнянь руху, рівняння нерозривності, рівнянь транспорту скалярних величин (температури, солоності, індикаторів-трасерів) та замикається двопараметричною  $k-\varepsilon$ -моделлю турбулентності.

Для адаптації моделі до умов лиману Сасик була генерована неструктурована криволінійна розрахункова сітка (рис. 2), яка складалась з 4697 розрахункових елементів (4927 вузлів) з перемінними розмірами – від 20 до 500 м. Сітка з достатньою точністю описує основні особливості геоморфологічної будови лиману та містить області телескопізації (1 та 2 на рис. 2) результатів моделювання для коректного врахування вузьких з'єднувальних каналів на акваторії

ліману, із збереженням прийняттого часу розрахунків на значних (річних) проміжках часу.

Для завдання в моделі просторового розподілу глибин в лимані Сасик (в метрах Балтійської системи висот та глибин) використовувались дані результатів промірних робіт на акваторії лиману, виконаних у 2009 році. При моделюванні використовувались 10 розрахункових рівнів за вертикаллю у  $\sigma$ -системі координат – кожен товщиною в 10% від повної локальної глибини.

Моделювання з метою верифікації моделі виконувалось за гідрометеорологічних умов 2019 року.

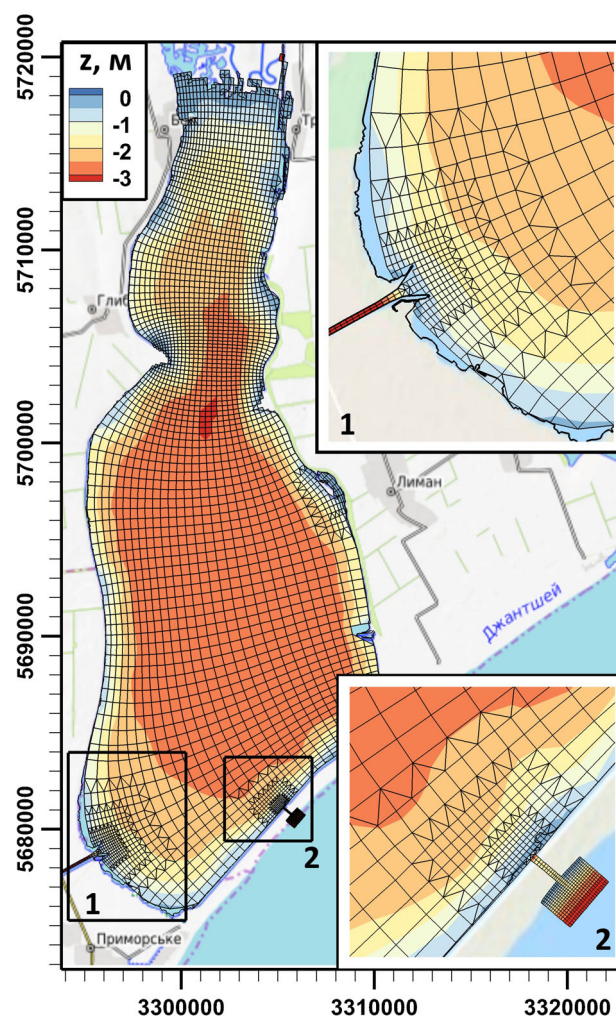


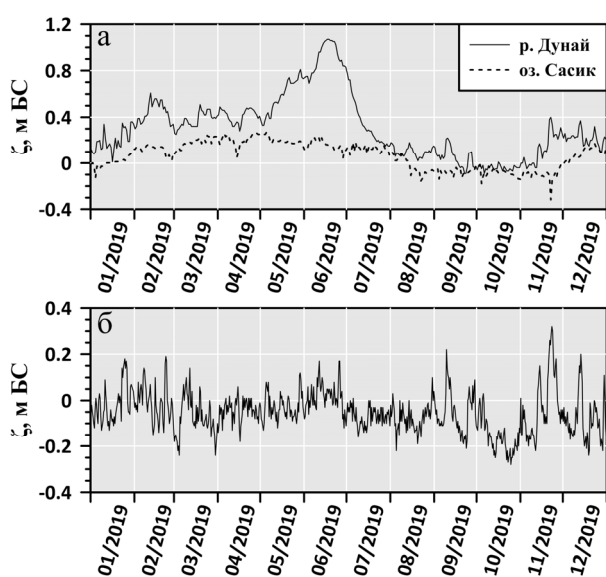
Рис. 2 – Розрахункова сітка, побудована для акваторії лиману Сасик: 1 – діючий канал «Дунай-Сасик»; 2 – з'єднувальний канал «Чорне море-Сасик», що пропонується

Fig. 2 – Computational grid and bathymetry of the Sasyk Lagoon: 1 – channel “Danube-Sasyk” (now operating as a flume); 2 – proposed channel “Black Sea-Sasyk”

При розрахунках, на верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області задавались: часова мінливість температури повітря,

напрямку і швидкості вітру, кількості атмосферних опадів за даними спостережень на МГП «Приморське» (3 на рис. 1); відносної вологості повітря та відсотку хмарності неба за даними спостережень на ГМС «Сарата» (6 на рис. 1). На боковій відкритій границі з'єднувального каналу «Дунай-Сасик» (1 на рис. 1) задавались спостережені протягом 2019 р. коливання рівня води в р. Дунай (рис. 3а) та мінливість температури і мінералізації дунайської води, надані Дунайською гідрометеорологічною обсерваторією.

При моделюванні враховувались оцінки середньомісячних витрат стоку в лиман річок Когильник і Сарата за умов маловодного року 75% забезпеченості, розраховані за моделлю «клімат-стік» [11, 12].



**Рис. 3** – Річна мінливість протягом 2019 р. відміток рівня води в р. Дунай, м БС, на відкритій границі каналу «Дунай-Сасик», у вдсх. Сасик біля с. Борисівка (а) та моря за даними МГП «Приморське» (б)

**Fig. 3** – Time series of water level measured in 2019: in the Danube River (solid line) and in the Sasyk lagoon (dashed line) (upper panel); sea level at the “Prymorske” (lower panel)

Відмітки дна в каналі «Дунай-Сасик» задавались на основі технічних характеристик каналу, наведених в [13, с. 33-34]. Слід зазначити, що на теперішній час існує деяка невизначеність щодо реальних відміток дна в каналі, викликана відсутністю актуальних даних промірів глибин кана-

лу, який постійно заноситься зваженими наночастинами зі сторони р. Дунай. Режим роботи головного пропускного шлюзу каналу протягом 2019 р. задавався в моделі відповідно до інформації, наданої Кілійським міжрайонним управлінням водного господарства.

Випаровування з водної поверхні лиману розраховувалось в самій моделі з урахуванням мінералізації вод лиману.

Для верифікації модельних розрахунків використовувались добові дані спостережень за рівнем і температурою води поверхневого шару вод в лимані Сасик протягом 2019 р. на гідрологічному посту «Борисівка». Вимірювання солоності води на цьому гідрологічному посту виконувались лише щоквартально. Початковий розподіл температури, солоності і відмітки рівня води у водоймі приймався однорідним у просторі.

### 3. АДАПТАЦІЯ ГІДРОТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ДО УМОВ ЛИМАНУ САСИК ТА ЇЇ ВЕРИФІКАЦІЯ

На першому етапі виконання модельних розрахунків було здійснено адаптацію чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D FM до умов лиману Сасик.

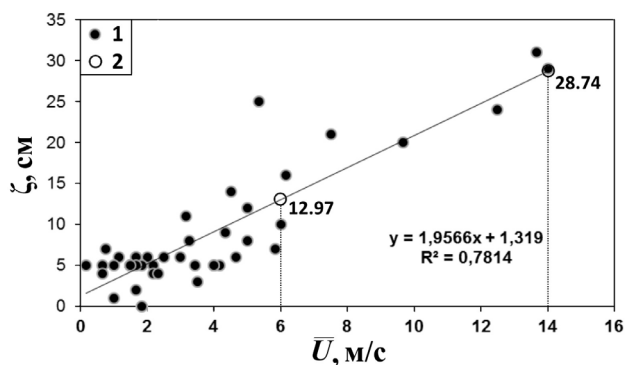
Під час адаптації моделі були проведені модельні розрахунки сталої вітрової циркуляції вод на акваторії лиману. Для калібрування баротропної складової моделі були використані емпіричні залежності розмаху коливань рівня води в лимані від швидкості вітру, наведені в [2] (рис. 4) та [9]. При цьому, основним параметром моделі, який підлягав налаштуванню, було обрано коефіцієнт поверхневого вітрового тертя  $c_d$ , який використовується для розрахунку вітрової напруги тертя  $\tau_s$  на верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області [14]:

$$|\tau_s| = \rho_a c_d U_{10}^2, \quad (1)$$

де  $\rho_a$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;  $U_{10}$  – швидкість вітру на висоті 10 м, м/с;  $c_d$  – коефіцієнт поверхневого вітрового тертя, який залежить від  $U_{10}$ :

$$c_d(U_{10}) = \begin{cases} c_d^A, & U_{10} \leq U_{10}^A, \\ c_d^A + (c_d^B - c_d^A) \frac{U_{10} - U_{10}^A}{U_{10}^B - U_{10}^A}, & U_{10}^A \leq U_{10} \leq U_{10}^B, \\ c_d^B + (c_d^C - c_d^B) \frac{U_{10} - U_{10}^B}{U_{10}^C - U_{10}^B}, & U_{10}^B \leq U_{10} \leq U_{10}^C, \\ c_d^C, & U_{10}^C \leq U_{10}. \end{cases} \quad (2)$$

Значення коефіцієнтів поверхневого вітрового тертя, встановлені під час калібрування моделі для умов лиману Сасик, приймалися рівними:  $c_d^A = 3,8 \times 10^{-3}$ ,  $c_d^B = 1,6 \times 10^{-3}$  та  $c_d^C = 1,235 \times 10^{-3}$  при швидкостях вітру 5, 10 та 15 м/с відповідно.



**Рис. 4** – Залежність розмаху коливань рівня води  $\zeta$ , см, від модуля швидкості вітру  $\bar{U}$ , м/с, для лиману Сасик за результатами: 1 – спостережень у 2011 р. [2]; 2 – розрахунків за моделлю Delft3D FM при стаціонарному північному вітрі швидкістю 6 та 14 м/с

**Fig. 4** – Dependence of water level in the Sasyk Lagoon on wind speed magnitude: 1 – observations made in 2011 [2]; 2 – results of Delft3D FM simulations under stationary northern winds of 6 and 14 m s<sup>-1</sup>

Моделльні розрахунки проводилось протягом 6 днів модельного часу за умов стаціонарних вітрів різних напрямків швидкістю 6 та 14 м/с. Встановлено, що усталення баротропної циркуляції вод та відхилень рівня води в лимані від стану спокою відбувається протягом перших 12-ти годин (0,5 діб) модельного часу. За умов стаціонарного вітру північного напрямку швидкістю 14 м/с максимальний перепад рівня між північною та південною частинами лиману складає 0,58 м, а за умов південного напрямку тієї ж швидкості – 0,52 м. Ці значення узгоджуються з емпіричною залежністю максимального перепаду рівня між північною і південною частинами

водосховища у разі вітрів північних румбів, наведеною в [9]. Однак, різниця в перепадах рівня води у разі південних і північних вітрів однієї швидкості не така велика, як при використанні залежностей, наведених в [9], що може бути наслідком зміни розподілу глибин у водоймі та гідрологічних умов.

На рис. 5 приведені, як приклад, результати моделювання просторової мінливості рівня води та циркуляції вод в лимані за умов стаціонарних вітрів північного та північно-західного напрямків швидкістю 14 м/с. Видно, що вітрова циркуляція вод в лимані має двошаровий характер у віддаленій від берегів відносно глибокій його частині, і одношаровий – у мілководній зоні вздовж берегу. Основні закономірності формування вітрової циркуляції вод у водоймищі Сасик подібні до визначених в роботах [8, 15], хоча є й особливості, пов'язані з просторовим розподілом глибин, конфігурацією берегів, які були встановлені завдяки застосуванню розрахункової сітки з високою просторовою деталізацією. До таких, наприклад, відноситься значно ширша ніж у [8] баротропна компенсаційна течія, спрямована проти вітру при повздовжніх відносно осі лиману вітрах, і, відповідно, значне звуження циркуляційних вихорів по обидві сторони від її струменя в південній частині лиману.

Верифікація моделі виконувалась за гідрометеорологічних умов 2019 року. В ході калібрування було встановлено, що при завданні кількості атмосферних опадів за даними різних гідрометеорологічних станцій – «Усть-Дунайськ», «Приморське», «Сарата», найбільш достовірні результати моделювання були отримані з використанням даних МГП «Приморське».

Основні параметри моделі Delft3D FM, визначені під час її калібрування для умов 2019 року, зведені в табл. 1.

**Таблиця 1** – Параметри моделі Delft3D FM, визначені при калібруванні  
**Table 1** – Delft3D FM model parameters determined during calibration

№ з/п	Назва параметру моделі	Одиниці виміру	Значення, яке задавалось
1.	Коефіцієнт горизонтальної турбулентної в'язкості	м <sup>2</sup> /с	0,1
2.	Коефіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії	м <sup>2</sup> /с	0,1
3.	Коефіцієнт вертикальної турбулентної в'язкості	м <sup>2</sup> /с	$5,0 \times 10^{-5}$
4.	Коефіцієнт вертикальної турбулентної дифузії	м <sup>2</sup> /с	$5,0 \times 10^{-5}$
5.	Коефіцієнт Смагоринського для підсіткової моделі турбулентності	-	0,1
6.	Коефіцієнт поверхневого вітрового тертя	-	від $3,80 \times 10^{-3}$ до $1,2350 \times 10^{-3}$
7.	Коефіцієнт донного тертя за Маннінгом	м <sup>-1/3</sup> с	від $1,80 \times 10^{-3}$ до $2,30 \times 10^{-3}$
8.	Число Дальтона (випаровування при вимушеній конвекції)	-	$1,60 \times 10^{-3}$
9.	Число Стентона (випаровування при контактному теплообміні з атмосферою)	-	$1,00 \times 10^{-3}$

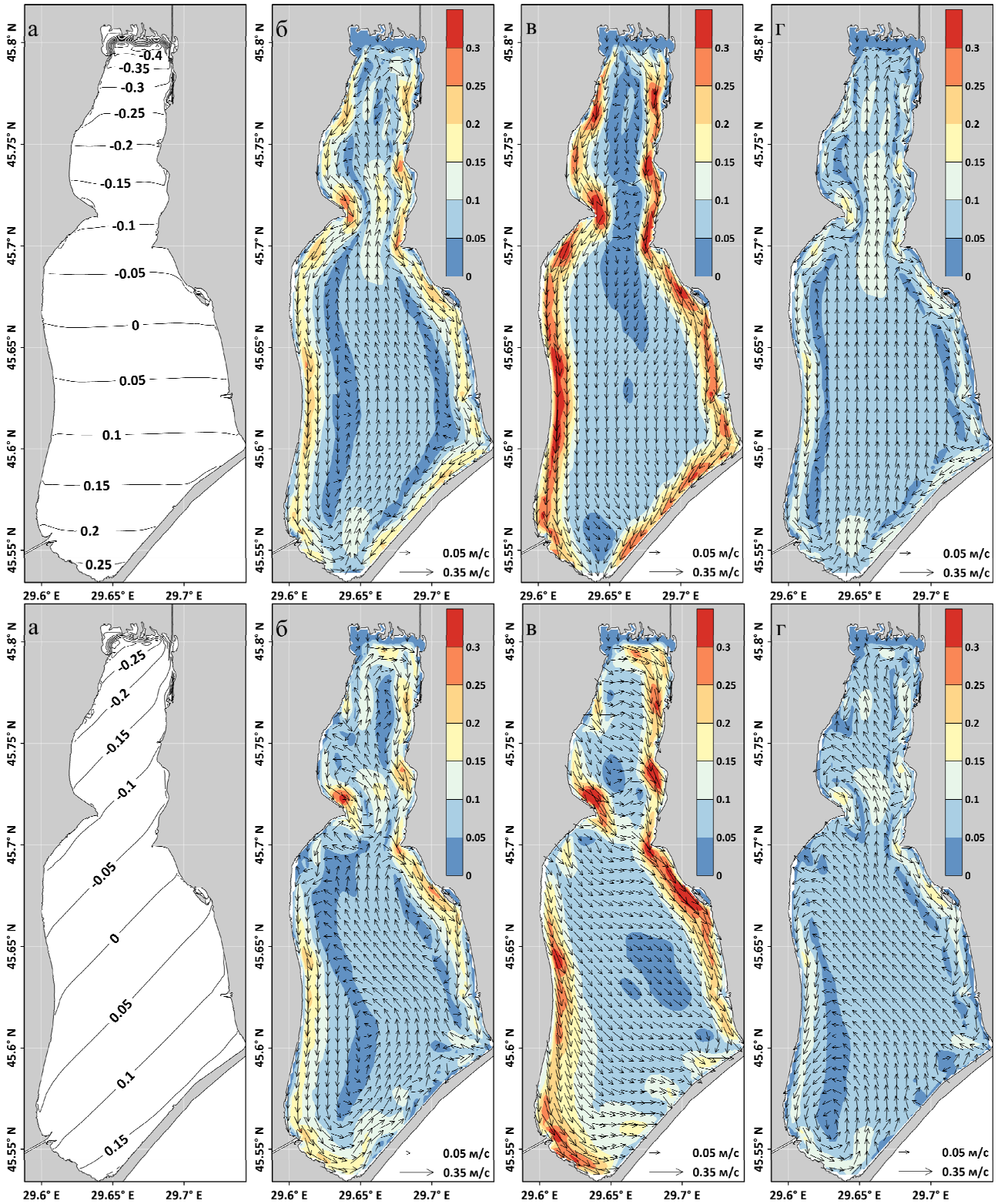


Рис. 5 – Поля відхилень рівня води, м, від незбуреного стану (а), векторів та модулю швидкості осереднених за глибиною (б), поверхневих (в) та придонних (г) течій, м/с, в лимані Сасик при стаціонарних вітрах північного (зверху) та північно-західного (знизу) напрямків швидкістю 14 м/с

Fig. 5 – Spatial distributions of modelled water level (A), depth-averaged (B), surface-level (C) and bottom-level (D) flow velocities in the Sasyk Lagoon for the stationary northern (upper panel) and north-western (lower panel) winds of  $14 \text{ m s}^{-1}$

На рис. 6 представлені графіки річної мінливості виміряних та змодельованих гідрологічних характеристик вод лиману Сасик у 2019 р. Незважаючи на деяку переоцінку моделлю максимальних відміток рівня води в період весняної повені (наприкінці квітня-початку травня), загальний хід рівня води в лимані протягом року відтворений моделлю достовірно (рис. 6а). Також добре узгоджуються модельовані і фактичні дані щодо річної мінливості поверхневої температури води в лимані (рис. 6в), що свідчить про коректний розрахунок тепло- та масообміну на верхній відкритій границі лиману в атмосферно-моделі.

Деякі більші розбіжності між модельованими та фактичними даними мають місце для солоності поверхневого шару вод лиману у четвертому кварталі 2019 р. (рис. 6б). Це можна пояснити як недостатнім обсягом наявних даних спостережень (4 виміряних значення солоності на рік), так і похибками, які виникають внаслідок: (1) неточності завдання поточних глибин у з'єднувальному каналі «Дунай-Сасик»; (2) завдання в моделі мінливості метеорологічних параметрів за даними метеостанцій, розташованих на значній (25-30 км) відстані від контрольної точки в лимані; (3) використанням розрахункових, а не фактичних даних щодо річкового стоку з водозбору лиману.

#### 4. МІНЛИВІСТЬ СОЛОНОСТІ ВОД У ВОДОЙМІ ЗА УМОВІ ВІДНОВЛЕННЯ ЇЇ ВОДООБМІНУ З МОРЕМ

Адаптована по умов вдсх. Сасик та верифікована за умов 2019 р. гідротермодинамічна модель Delft3D FM, була використана для попереднього оцінювання характеру коливань солоності води в лимані після відновлення його зв'язку з морем через штучно створений у пересипу сполучний канал «море-лиман» шириною 100 м та глибиною 1,5 м.

Для проведення розрахунків водообміну лиману з морем на криволінійній розрахунковій сітці було згенеровано область підвищеної деталізації, яка включала як з'єднувальний канал, так і частину прилеглої морської акваторії (2 на рис. 2).

В чисельних експериментах з моделлю розглядалися такі варіанти водного менеджменту лиману за гідрометеорологічних умов 2019 р.:

- варіант 1 – надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» відсутнє,

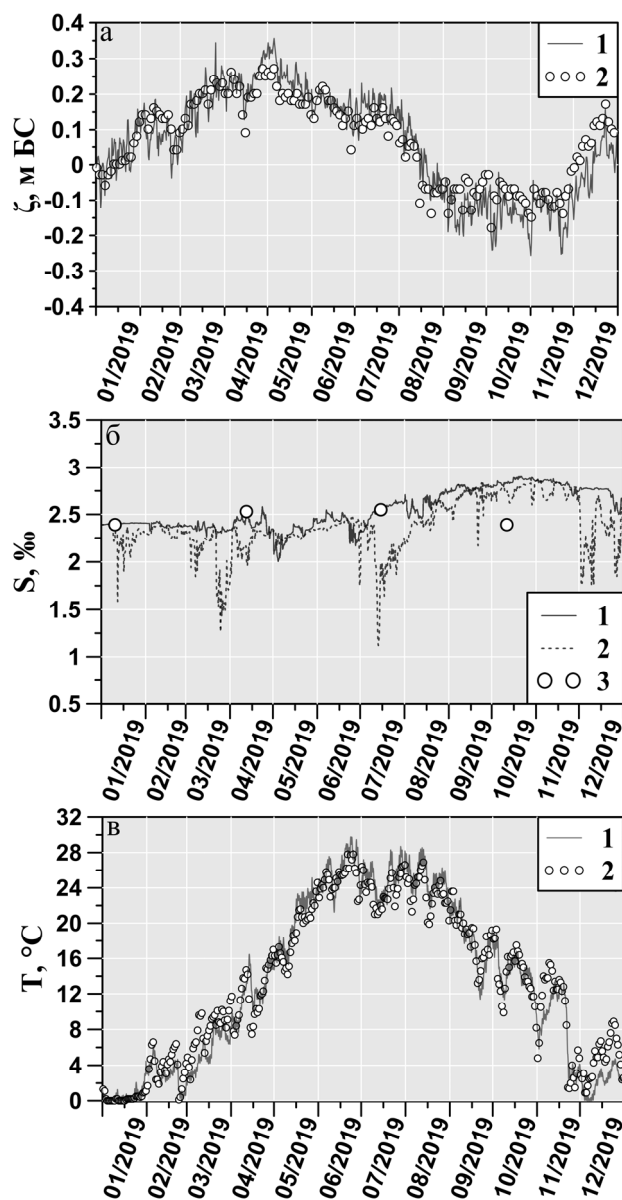


Рис. 6 – Мінливість змодельованих та спостережених гідрологічних характеристик вод вдсх. Сасик у 2019 році: а – рівня води, м БС (1 – за результатами моделювання на ділянці акваторії біля с. Борисівка, 2 – натурні спостереження); б – солоності води, ‰ (1 – за результатами моделювання на ділянці акваторії біля с. Борисівка, 2 – за результатами моделювання у південній частині лиману, 3 – натурні спостереження); в – температури води, °С (1 – за результатами моделювання на ділянці акваторії біля с. Борисівка; 2 – натурні спостереження)

Fig. 6 – Time series of measured and modelled hydrological parameters of the Sasyk Lagoon waters in 2019: A – modelled (solid line) and measured (white dots) water level in the water area near Borysivka village; B – modelled water salinity in the water area near Borysivka village (solid line) and in the southern part of the lagoon (dashed line); observed water salinity (white dots); C – modelled (solid line) and measured (white dots) water temperature in the water area near Borysivka village



а канал «море-лиман» відкритий протягом року;

- варіант 2 – надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» відсутнє, канал «море-лиман» відкритий протягом року, а початкові умови для розрахунку взяті з останнього моменту часу розрахунку за варіантом 1 (перший рік розрахунків);
- варіант 3 – надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» відбувається протягом травня-липня, канал «море-лиман» відкритий протягом року, а початкові умови для розрахунку брались з останнього моменту часу розрахунку за варіантом 1.

Для всіх варіантів розрахунків на відкритій морській границі з'єднувального каналу «море-лиман» задавались коливання рівня моря (рис. 3б), мінливість солоності та температури морської води за даними спостережень на МГП «Приморське».

Часова мінливість солоності води в південній та північній частинах лиману, отримана при моделюванні вказаних вище варіантів водного менеджменту, показана на рис. 7, 9.

З рис. 7 видно, що у разі функціонування тільки каналу «море-лиман», до кінця першого року моделювання (варіант 1) відбувається підвищення солоності вод в лимані до її значень характерних для морських вод. Протягом другого року моделювання (варіант 2) солоність вод в лимані, починаючи з серпня, перевищує солоність морських вод внаслідок інтенсивного випаровування. На кінець другого року моделю-

вання солоність лиманних вод приблизно на 5 % перевищує солоність морських вод.

Для визначення часу водооновлення лиману Сасик морськими водами, які надходять до нього через з'єднувальний канал, застосовувалась методика апробована в [16]. Як індикатор проникнення морських вод в лиман і ступеня водооновлення ними вод різних частин лиману, розглядалася домішка нейтральної плавучості, концентрація якої в морській воді приймалася рівною 100 умовним одиницям (ум. од.), а в лимані в початковий момент часу – нулю. У такій постановці, динаміка концентрації умовної домішки в кожній точці розрахункової області лиману відповідає динаміці об'ємної концентрації морської води, представленій у відсотках. Досягнення верхньої межі в 100 ум. од. відповідає повному водооновленню в розрахунковій точці в результаті надходження морських вод.

Результати розрахунків динаміки об'ємної концентрації морської води в точках, які розташовані в північній і південній частинах лиману, у разі реалізації варіантів 1-2 показані на рис. 8. Вони свідчать, що час повного водооновлення лиману складе 1 рік і 5 місяців. Незважаючи на те, що вся вода в лимані обновляється морською вже до середини 2-го року моделювання (варіант 2), зростання солоності вод в лимані продовжується до кінця року.

Отже, постійне функціонування протягом року з'єднувального каналу «море-лиман» шириною 100 м і глибиною 1,5 м не здатне запобігти

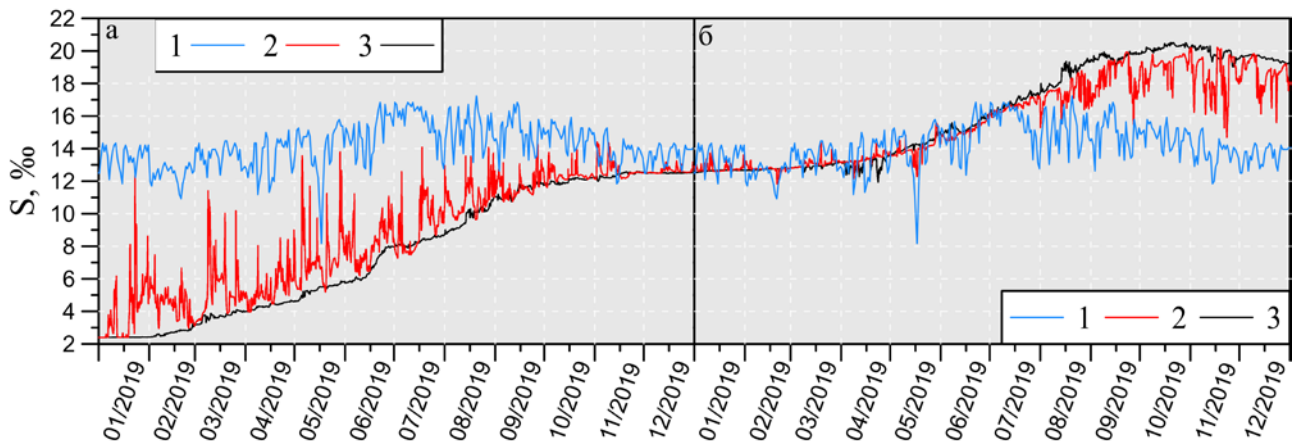


Рис. 7 – Зміни солоності води в лимані Сасик та у морі: а – варіант 1; б – варіант 2 (1 – в морі біля каналу, 2 – точка в південній частині лиману; 3 – точка в північній частині лиману)

Fig. 7 – Time series of modelled water salinity, in ppt, in the Sasyk Lagoon and in the sea: A – variant 1; B – variant 2 (blue line – in the sea near the channel; red line – in the southern part of the lagoon; black line – in the northern part of the lagoon)

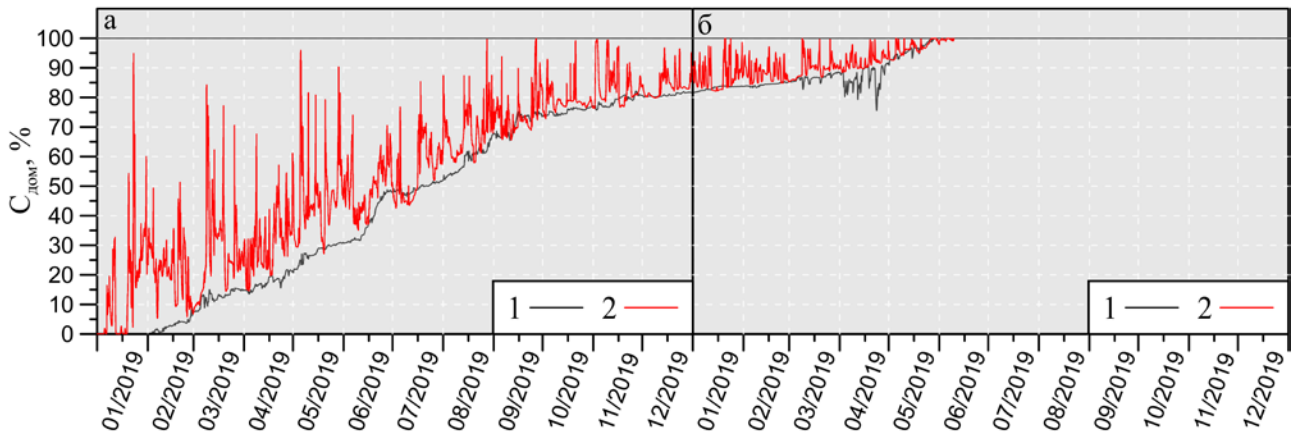


Рис. 8 – Зміни об'ємної концентрації морської води, %, яка надходить до лиману Сасик через канал «море-лиман»: а – варіант 1; б – варіант 2 (1 – точка в північній частині лиману, 2 – точка в південній частині лиману)

Fig. 8 – Time series of tracer concentration, in per cent, in the Sasyk Lagoon: A – variant 1; B – variant 2 (red line – in the southern part of the lagoon)

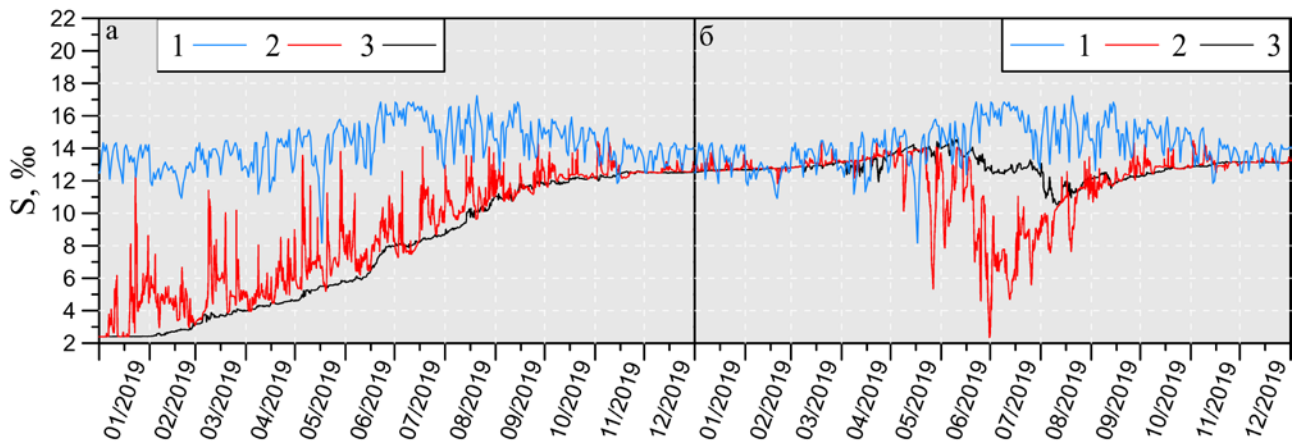


Рис. 9 – Зміни солоності води в лимані Сасик та у морі: а – варіант 1; б – варіант 3 (1 – в морі біля каналу, 2 – точка в південній частині лиману; 3 – точка в північній частині лиману)

Fig. 9 – Time series of modelled water salinity, in ppt, in the Sasyk Lagoon and in the sea: A – variant 1; B – variant 3 (blue line – in the sea near the channel; red line – in the southern part of the lagoon; black line – in the northern part of the lagoon)

засоленню вод лиману у багаторічній перспективі і забезпечити стабілізацію його гідроекологічного режиму. Однак, такі вимоги забезпечуються у разі реалізації варіанту 3 водного менеджменту лиману (рис. 9), коли забезпечується надходження дунайських вод до лиману протягом травня-липня – в період, коли відмітки рівня води в р. Дунай за умов 2019 р. значно перевищували відмітки рівня води в лимані.

Важливим показником зміни характеристик гідрологічного режиму водоймища Сасик в перехідний період його ренатуралізації в морський лиман є мінливість солоності вод. Вважається, що після відновлення водообміну з морем, при підвищенні значень солоності води до 7-8 ‰,

відбудеться масова загибель прісноводних видів флори і фауни і почнеться формування морської екосистеми водоймища [17]. Результати для першого року моделювання (варіант 1), наведені на рис. 7, демонструють, що проміжок часу з моменту початку водообміну з морем, протягом якого буде досягнута ця критична межа солоності, складає для південної частини лиману приблизно 4 місяця, а для північної – 5,5 місяця. Однак, навіть протягом перших 4-х місяців року, солоність вод в південній частині лиману може короткочасно зростати до значень, які перевищують критичні 7-8 ‰.

## 5. ВИСНОВКИ

Результати адаптації до умов водосховища Сасик та верифікації чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D FM свідчать про можливість її застосування для вивчення різних гідрологічних аспектів та наслідків повернення водойми до природного статусу морського лиману шляхом відновлення водообміну з морем.

На підставі результатів сценарного моделювання за гідрометеорологічних умов 2019 р. було встановлено, що у разі припинення надходження до водойми дунайських вод через канал «Дунай-Сасик» та встановлення постійного протягом року водообміну водойми з морем через штучний з'єднувальний канал «море-лиман» шириною 100 м і глибиною 1,5 м, час повного водооношення лиману складе 1 рік і 5 місяців, але стабілізація солоності вод в лимані не відбудеться, тобто в багаторічній перспективі буде відбуватись засолення вод лиману. Проміжок часу з моменту початку водообміну з морем, протягом якого буде досягнута критична для існування прісноводних видів флори і фауни межа 7-8 ‰ солоності вод в лимані, становить для південної частини лиману приблизно 4 місяці, а для північної – 5,5 місяця. Після цього почнеться формування морської екосистеми водоймища.

Разом з тим, в роботі показано, що стабілізація солоності вод в лимані в другий рік моделювання може бути досягнута у разі забезпечення надходження дунайських вод до лиману протягом періоду, коли відмітки рівня води в р. Дунай значно перевищували відмітки рівня води в лимані (травень-липень 2019 р.).

Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні, на підставі результатів чисельного моделювання, ефективності заходів щодо збільшення ширини з'єднувального каналу до 300 м та його поглиблення до 2 м. Як альтернативний варіант – створення 2 штучних каналів шириною 100-150 м на краях пересипу. Важливою також є оцінка інтенсивності розмиву або занесення каналу (каналів) з різними морфометричними характеристиками.

## ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку экс-директору Дунайської гідрометеорологічної обсерваторії В. М. Морозову за надані для підготовки статті дані спостережень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенгурт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов одесских лиманов: монография. Киев: Наукова думка, 1974. 224 с.
2. Иванова Н. О. Динаміка рівня водної поверхні Сасика на різних етапах існування водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. №4 (51). С. 63-75.
3. Ляшенко А. В., Зорина-Сахарова Е. Е. Гидроэкологическая характеристика лимана Сасык и Сасыкского водохранилища. *Гідробіологічний журнал*. 2017. 53(1). С. 28-46.
4. Ляшенко А. В., Зорина-Сахарова Е. Е. Гидролого-гидрохимическая характеристика лимана Сасык и Сасыкского водохранилища. *Гідробіологічний журнал*. 2016. 52(6). С. 99-109.
5. Тучковенко Ю. С. Современный гидроэкологический режим водохранилища Сасык и проблемы его реконструкции в морской лиман. Труды международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов»: Т.1 «Гидро- и геодинамические процессы», 17-20 мая. Пермь, Россия, 2011. С. 162 – 167. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/7776/>
6. Тучковенко Ю. С., Гопченко Е. Д. Аналіз сучасного гідрологічного режиму водосховища Сасик та експертна оцінка очікуваних його змін при реконструкції у морській лиман. *Матеріали звітної науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників Одеського державного екологічного університету*, 2-4 лютого. Одеса: ОДЕКУ, 2009. С. 38-40. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/5379/>
7. Лозовіцький П. С. Гідрологічний режим та оцінювання якості води озера-водосховища Сасик у часі. *Часопис картографії*. 2013. Вип. 6. С. 146-170.
8. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья: монография. Киев: Наукова думка, 1990. 240 с.
9. Лонин С. А., Тучковенко Ю. С. Водообмен лимана Сасык и Черного моря. *Водные ресурсы*. 1995. 22(4). С. 107-117. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/4526/>
10. Deltares. (2020). *D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 0.9.1, SVN revision: 66806*. Delft, the Netherlands URL: [http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow\\_FM\\_User\\_Manual.pdf](http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow_FM_User_Manual.pdf) (дата звернення: 05.10.2020).
11. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Водные ресурсы северо-западного Причерноморья (в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях): монография. Киев: КНТ, 2005. 188 с.
12. Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния: монография. Одесса: Экология, 2005. 208 с.
13. Математичне моделювання процесів замулення підводних каналів-ковзів до шлюзів-регуляторів на придунайських озерах: звіт з НДР ДР 0113U005799 (науковий керівник: к.т.н., проф. О.Г. Кулібабін) / Од. держ. екол. ун-т. Одеса, 2017. 152 с.
14. Interactions between Lake-Level Fluctuations and Waterlogging Disasters around a Large-Scale Shallow Lake: An Empirical Analysis from China / Wang, Z., Wang, K., Liu, K. et al. *Water*. 2019. 11(2):318. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/318> (дата

звернення: 05.10.2020).

15. Тучковенко Ю. С., Кушнір Д. В., Грїб О. Н. Моделирование ветровой циркуляции вод и денивеляций уровня в Куяльницьком лимане. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2017. Вип. 22. С. 80-89. <http://eprints.library.odku.edu.ua/2293/>
  16. Tuchkovenko Y., Tuchkovenko O., Khokhlov V. Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. 5. pp. 37-46. DOI: [10.21303/2461-4262.2019.00979](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00979).
  17. Розробка соціально-економічного та екологічного обґрунтування відновлення гідрологічного режиму озера Сасик: звіт з НДР (науковий керівник: к.б.н. О.Г. Васенко) / Український науково-дослідний інститут екологічних проблем. Харків. 2004. 215 с.
- ## REFERENCES
1. Rozengurt, M.Sh. (1974). *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktivnoy prirodnykh resursov odesskikh limanov [Hydrology and prospects for the reconstruction of natural resources of the Odessa lagoons]*. Kiev: Naukova dumka. (in Russ.)
  2. Ivanova, N.O. (2018). [The dynamics of the level of the water surface of Sasyk at different stages of the existence of the reservoir]. *Hidrologiya, hidrokhimiya i hidroekologiya [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 4(51), pp. 63-75. (in Ukr.)
  3. Lyashenko, A.V. & Zorina-Sakharova, E.E. (2017). Gidroekologicheskaya kharakteristika limana Sasyk i Sasykskogo vodokhranilishcha [Hydroecological characteristics of the Sasyk Lagoon and the Sasyk reservoir]. *Gidrobiologichnyy zhurnal [Hydrobiological Journal]*, 53 (1), pp. 28-46. (in Russ.)
  4. Lyashenko, A.V. & Zorina-Sakharova, E.E. (2016). Gidrologo-gidrokhimicheskaya kharakteristika limana Sasyk i Sasykskogo vodokhranilishcha. [Hydroecological and hydrochemical characteristics of the Sasyk Lagoon and the Sasyk reservoir]. *Gidrobiologichnyy zhurnal [Hydrobiological Journal]*, 52 (6), pp. 99-109. (in Russ.)
  5. Tuchkovenko, Yu.S. (2011). [The modern hydroecological regime of the Sasyk reservoir and the problems of its reconstruction into the coastal lagoon]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov»: T.1 «Gidro- i geodinamicheskie protsessy» [Proceedings of international scientific and practical Conference "Contemporary problems of reservoirs and their catchments": Vol. 1 "Hydro- and geodynamic processes"]*, 17-20 May. Perm, Russia, pp.162–167. (in Russ.)
  6. Tuchkovenko, Yu.S. & Hopchenko, Ye.D. (2009) [Analysis of the current hydrological regime of the Sasyk Reservoir and expert assessment of its expected changes during the reconstruction into the coastal lagoon]. *Materialy zvitnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii naukovo-pedahohichnykh pratsivnykiv Odeskoho derzhavnogo ekolohichnoho universytetu [Proceedings of the reporting scientific and technical Conference of scientific and pedagogical workers of Odessa State Environmental University]*, 2-4 February. Odesa, pp. 38-40. (in Ukr.)
  7. Lozovitskyi, P.S. (2013). [Hydrology regime and water quality estimation of lake-reservoir Sasyk in time]. *Chasopys kartohrafii [Magazine of Cartography]*, 6, pp. 146-170. (in Ukr.)
  8. Timchenko, V.M. (1990). *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya [Ecological and hydrological studies of water bodies in the north-western Black Sea region]*. Kiev: Naukova dumka. (in Ukr.)
  9. Lonin, S.A. & Tuchkovenko, Yu.S. (1995). Vodoobmen limana Sasyk i Chernogo morya [Water exchange of the Sasyk Lagoon and the Black Sea]. *Vodnye resursy [Water Resources]*, 22(4), pp. 107-117. (in Russ.)
  10. Deltares. (2020). *D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 0.9.1, SVN revision: 66806*. Delft, the Netherlands. Available at: [http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow\\_FM\\_User\\_Manual.pdf](http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow_FM_User_Manual.pdf) (accessed: 05.10.2020).
  11. Gopchenko, E.D. & Loboda, N.S. (2005). *Vodnye resursy severo-zapadnogo Prichernomor'ya (v estestvennykh i narushennykh khozyaystvennoy deyatelnosti usloviyakh) [Water resources of the northwestern Black Sea region (in natural and disturbed economic conditions)]*. Kiev: KNT. (in Russ.)
  12. Loboda, N.S. (2005). *Raschety i obobshcheniya kharakteristik godovogo stoka rek Ukrainy v usloviyakh antropogennogo vliyaniya [Calculations and generalizations of the characteristics of the annual runoff of Ukrainian rivers under conditions of anthropogenic influence]*. Odessa: Ekologiya. (in Russ.)
  13. Odessa State Environmental University. (2017). Scientific Report DR 0113U005799: *Matematychno modeliuвання protsesiv zamulennia pidvidnykh kanaliv-kovshiv do shliuziv-rehuliatoriv na prydnaiskykh ozerakh [Mathematical modeling of siltation processes in underwater inlet channels-collectors up to sluices-regulators on the Danubian lakes]*. Odesa. (in Ukr.)
  14. Wang, Z., Wang, K., Liu, K. et al. (2019). Interactions between Lake-Level Fluctuations and Waterlogging Disasters around a Large-Scale Shallow Lake: An Empirical Analysis from China. *Water*, 11(2):318. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/318> (accessed: 05.10.2020).
  15. Tuchkovenko, Yu.S., Kushnir, D.V. & Grib, O.N. (2017). [Modelling of wind-induced circulation of water and water level denivellation in the Kuaialnytskyi Lyman Lagoon]. *Visnik Odeskogo derzhavnogo ekolohichnoho universytetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 22, pp. 80-89. (in Ukr.)
  16. Tuchkovenko, Y., Tuchkovenko, O. & Khokhlov, V. (2019). Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, pp. 37-46. DOI: [10.21303/2461-4262.2019.00979](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00979).
  17. Ukrainian Research Institute of Environmental Problems. (2017). Scientific Report. *Rozrobka sotsialno-ekonomichnoho ta ekolohichnoho obgruntuвання vidnovlennia hidrolohichnoho rezhymu ozera Sasyk [Development of socio-economic and ecological justification for the restoration of the hydrological regime of Lake Sasyk]*. Kharkiv. (in Ukr.)

## MODELLING THE VARIABILITY OF HYDROLOGICAL PARAMETERS OF THE SASYK RESERVOIR IMPOUNDMENT UNDER VARIOUS OPTIONS OF ITS OPERATION

D.V. Kushnir, Yu.S. Tuchkovenko

*Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,  
dkush@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

This paper highlights the results of adaptation and verification of the Delft3D Flexible Mesh numerical model under the conditions of the Sasyk reservoir. The objective of this work is to evaluate the expected spatio-temporal variability of water salinity in the Sasyk reservoir after completion of the Sasyk renaturalization project by means of establishing a constant water exchange with the sea through the artificial channel.

The Sasyk Lagoon was separated from the sea and transformed into a freshwater reservoir in the late 1970s. However, due to the poor water quality in the Sasyk reservoir in the modern period, the solution of the problem of transforming the reservoir to its original coastal conditions, i.e. the renaturalization, has acquired particular importance.

Model results, obtained under conditions of 2019, indicate the possibility of using a hydrodynamic model to evaluate the effectiveness and possible consequences of various scenario-based decisions to be implemented for the management of the hydrological regime of the reservoir under various options of its operation.

The model runs were used to evaluate the flushing time of the Sasyk Lagoon and the pattern of the salinity fluctuations in the reservoir after the restoration of the artificial channel in the sand bar with a width of 100 m and a depth of 1.5 m and the establishment of the constant “sea-lagoon” interconnection. Applying the hydrometeorological conditions of 2019, a scenario-based modelling for two consecutive years was performed. For the first year of the simulation, a variant of water management under the absence of freshwater inflow from the Danube and the presence of sea water inflow throughout the year was considered. The model results at the end of the first year of the simulation were set as the initial conditions for the second year, and the rest of the external forcing remained unchanged. Additionally, the variant considering the Danube discharge into the lagoon during May-July for the second year of simulation was investigated.

Based on the simulation results, it was found that in the case of a constant water exchange with the sea through the connecting “sea-lagoon” channel (with the abovementioned morphometric characteristics) and under the absence of the Danube freshwater inflow throughout the year: 1) the flushing time of the lagoon will be 1 year and 5 months; 2) stabilization of water salinity in the lagoon will not occur, i.e. the salinization of the lagoon water takes place in the long-term perspective; 3) the time period from the moment of initiating the water exchange with the sea, during which the lagoon reaches the water salinity limit of 7-8 ‰, that is critical for the existence of freshwater species of flora and fauna, is expected to amount to 4 months for the southern part and to 5.5 months for the northern part of the lagoon; after which the formation of the marine ecosystem of the reservoir will begin.

It is shown that the stabilization of water salinity in the lagoon in the second year of the simulation can be achieved under conditions of ensuring the Danubian freshwater discharge in the period of significantly higher water level in the Danube River, compared to the lagoon water level (May-July 2019).

**Keywords:** Sasyk Lagoon, renaturalization, hydrological parameters, modelling, verification, water exchange with the sea

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОЕМА САСЫК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Д. В. Кушнір, Ю. С. Тучковенко

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,  
dkush@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

В работе освещены результаты адаптации к условиям водоема Сасык и верификации численной гидротермодинамической модели Delft3D Flexible Mesh, а также применение этой модели для оценки ожидаемой пространственно-временной изменчивости солености

вод в водоеме после его ренатурализации в морской лиман путем установления постоянного водообмена лимана с морем через искусственный соединительный канал.

В конце 70-х годов XX века морской лиман Сасык был отделен от моря и преобразован в пресноводное водохранилище. Однако, из-за низких показателей качества вод водохранилища в современный период, особую актуальность приобрело решение задачи возвращения водоему первоначального статуса морского лимана, то есть его ренатурализации.

Полученные результаты моделирования изменчивости гидрологических характеристик водохранилища Сасык при условиях 2019 года свидетельствуют о возможности применения гидротермодинамической модели для оценки эффективности и возможных последствий принятия различных сценарных решений по управлению гидрологическим режимом водоема при различных вариантах его эксплуатации.

Модель Delft3D FM была использована для оценки времени водообновления лимана Сасык морскими водами, а также характера колебаний солености его вод после восстановления связи с морем через искусственно созданный в пересыпи соединительный канал «море-лиман» шириной 100 м и глубиной 1,5 м. Сценарное моделирование выполнялось при гидрометеорологических условиях 2019 года для двух последовательных лет. В первый год моделирования рассматривался вариант водного менеджмента, когда поступление дунайских вод в лиман через канал «Дунай-Сасык» отсутствует, а канал «море-лиман» открыт на протяжении года. Во второй год моделирования, в качестве начальных условий принимались результаты расчетов на конец первого года, но внешнее воздействие в модели оставалось неизменным. Для второго года расчетов дополнительно рассматривался вариант поступления дунайских вод в лиман через канал «Дунай-Сасык» в мае-июле.

По результатам моделирования установлено, что в случае обеспечения на протяжении года постоянного водообмена лимана с морем через соединительный канал «море-лиман» (с указанными морфометрическими характеристиками) и в отсутствии поступления дунайских вод в лиман через канал «Дунай-Сасык»: 1) время полного водообновления лимана составит 1 год и 5 месяцев; 2) стабилизация солености вод в лимане не произойдет, т. е. в многолетней перспективе будет происходить засоление вод лимана; 3) промежуток времени с момента начала водообмена с морем, на протяжении которого будет достигнута критическая для существования пресноводных видов флоры и фауны граница солености вод лимана в 7-8 ‰, составляет для южной части лимана приблизительно 4 месяца, а для северной – 5,5 месяцев; после чего начнется формирование морской экосистемы водоема.

Показано, что стабилизация солености вод в лимане во второй год моделирования может быть достигнута в случае обеспечения поступления в лиман дунайских вод в период, когда отметки уровня воды в р. Дунай значительно превышали отметки уровня воды в лимане (май-июль 2019 г.).

**Ключевые слова:** лиман Сасык, ренатурализация, гидрологические характеристики, моделирование, верификация, водообмен с морем.

*Подання до редакції : 23. 11. 2020  
Надходження остаточної версії : 06. 12. 2020  
Публікація статті : 17. 12. 2020*