

УДК 551.468.4

## МОДЕЛЮВАННЯ МІНЛИВОСТІ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУЗЛІВСЬКОЇ ГРУПИ ЛИМАНІВ ЗА РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ЇХ ВОДООБМІНУ З МОРЕМ

Ю. С. Тучковенко, Д. В. Кушнір

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [tuch2001@ukr.net](mailto:tuch2001@ukr.net),  
<https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

Стаття присвячена вирішенню проблеми стабілізації гідрологічного режиму і гідроекологічного стану групи Тузлівських лиманів, розташованих в центральній частині Дунай-Дністровського межиріччя, шляхом забезпечення та регулювання їх водообміну з відкритим морем через штучно створені канали у косі-пересипу, що відділяє водойму від моря. Наведені результати адаптації відомої сучасної чисельної гідродинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh до умов лиманів Тузлівської групи, а також застосування її для визначення ефективності різних варіантів забезпечення водообміну з морем на підставі результатів сценарного математичного моделювання. Зокрема, досліджені варіанти функціонування: (1) відносно вузького з'єднувального каналу на 2-му км коси-пересипу (л. Бурнас) сумісно с широкою і глибокою прорвою, яка існувала до 2015 р. на 24-му км коси-пересипу (л. Шагани); (2) широкого контрольованого з'єднувального каналу в л. Шагани на місці прорви, разом із вищезазначеним каналом в л. Бурнас; (2) додаткового (третього) вузького каналу на ділянці коси пересипу прилеглої до л. Алібей. Як індикатор ефективності управлінських рішень щодо забезпечення стабільності гідроекологічних умов в лиманах використовуються характеристики річного циклу просторово-часової мінливості солоності води. На підставі аналізу результатів сценарного моделювання зроблений висновок, що оптимальне вирішення проблеми стабілізації гідроекологічного режиму водойми полягає в забезпеченні постійного протягом року різноспрямованого водообміну з морем через два штучних з'єднувальних канали в косі-пересипу з відмітками дна мінус 1,0 м БС, шириною 60 м – для л. Шагани та 15 м – для л. Бурнас. В цьому випадку не буде відбуватись засолення водойми у багаторічній перспективі. Визначений час повного водооновлення морською водою основних лиманів Тузлівської групи, який у вказаному варіанті буде дорівнювати 8 місяців для лиману Шагани і 12 місяців для лиманів Алібей і Бурнас.

**Ключові слова:** Тузлівські лимани; солоність вод; водообмін з морем; сценарне моделювання; водооновлення

### 1. ВСТУП

Тузлівська група лиманів розташована в центральній частині Дунай-Дністровського межиріччя. Вона утворилась в результаті затоплення морем низьких ділянок суші, і, в подальшому, була відокремлена від моря піщаним пересипом – баром. У складі Тузлівської групи лиманів виділяють 3 основних («первинних») лимани: Шагани, Бурнас, Алібей, а також ряд «вторинних» (рис. 1). Всі вони можуть бути об'єднані в такі 3 групи: 1) *Шагани* + Будури + Магалевський + Мартаза; 2) *Алібей* + Карачаус + Хаджидер; 3) *Бурнас* + Курудіол + Солоний. Так як основні лимани Шагани, Бурнас і Алібей сполучені між собою широкими протоками і відокремлені від моря однією загальною косою-пересипом, то вони розглядаються як єдиний

лиманий комплекс. Довжина пересипу, що відокремлює лимани від моря становить 29 км, ширина змінюється від 60 до 400 м.

Історично Тузлівські лимани використовувались для рибного промислу, видобутку поваренної солі, відпочинку та лікування (бальнеології). Як водно-болотні екосистеми, Тузлівські лимани відігравали важливу екологічну роль для збереження та відтворення біологічного різноманіття, особливо коловодних птахів під час їх міграції, гніздування та зимівлі, а також чорноморської іхтіофауни.

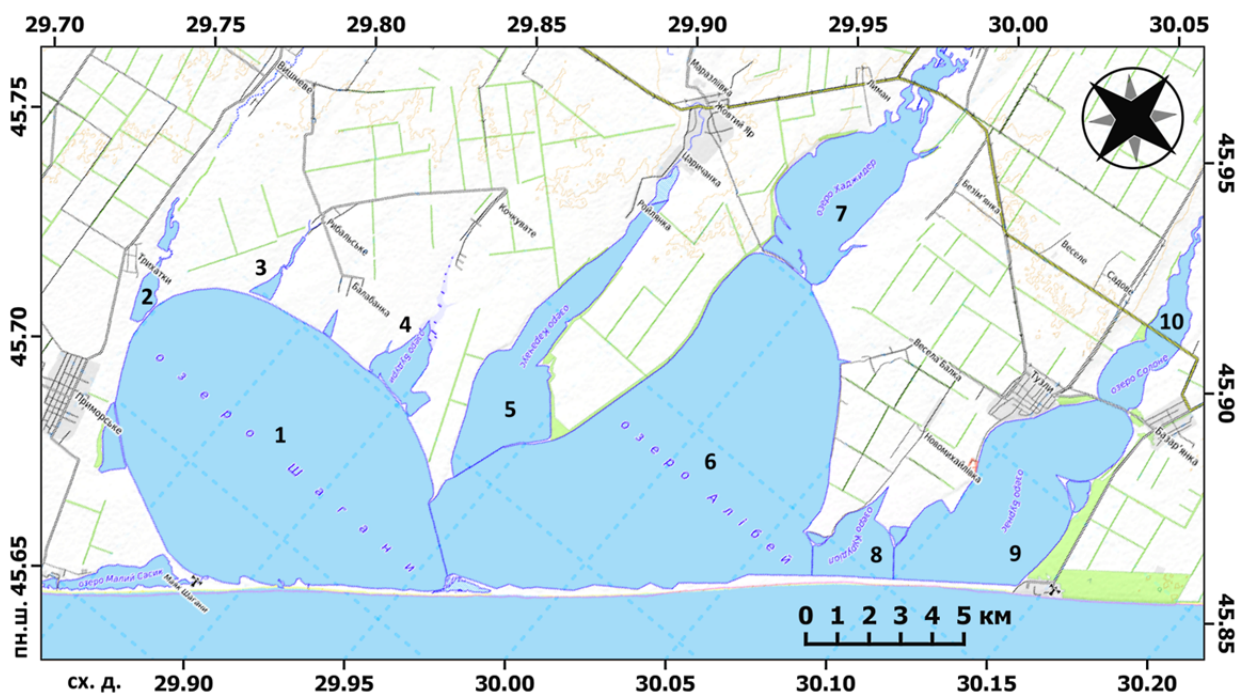
У 1995 році систему лиманів «Шагани-Алібей-Бурнас» Постановою Кабінету Міністрів України від 23.11.1995 року №935 було включено до переліку водно-болотних угідь міжнародного значення на підставі критеріїв Рамсарської

конвенції. В 2010 р. Указом Президента України №1/2010, з метою збереження, відтворення та раціонального використання унікальних природних комплексів водно-болотних угідь міжнародного значення як середовища існування водоплавних птахів, а також об'єктів північного Причорномор'я, що мають важливе природоохоронне, наукове, історико-культурне, естетичне, рекреаційне та оздоровче значення, був створений національний природний парк «Тузлівські лимани». Загальна площа парку становить 27865,00 га, з якої на водні акваторії лиманів припадає близько 82 %. У 2016 р. територія національного парку увійшла до складу Смарагдової мережі Європи як об'єкт «Tuzlivski limany» №UA0000140.

Стан природних ресурсів Тузлівської групи лиманів та їх використання визначаються наявністю зв'язку з морем через природні прорви-промоїни, які можуть створюватись в косі-пересипу під дією штормів, або через штучно створені канали. Річний прісний баланс Тузлівських лиманів є від'ємним через значне перевищення його витратної складової над прибутковою. У разі, якщо цей дефіцит водних ресурсів не компенсується надходженням морських вод, відбувається обміління та осолонення лиманів.

Відомо, що в XIX ст., коли лимани були довгий час ізольовані від моря, і солоність вод в них досягала 200 ‰, на їхній акваторії здійснювався видобуток солі. При катастрофічному падінні рівня води в 1868-1869 рр. Тузлівські лимани перетворилися на гіпергалинні болотні солонці [1, 2]. За свідченням [3], в умовах повної відсутності водообміну з морем, обміління та висихання лиманів відбувається протягом 3-4 років.

У XX столітті в Тузлівських лиманах активно здійснювався рибний промисел, якому сприяв режим сталого водообміну лиманів з прилеглою морською акваторією через штучно створені в Тузлівській косі обловно-запускні канали. Канали застосовувались для запуску весною в лиман молоді риб (насамперед кефалевих) з прилеглої частини моря для нагулу. Восени, коли лиманні води охолоджуються швидше за морські, в каналах здійснювався вилов риби, яка прагнула вийти в море. За свідченням [4], з 1953 по 1990 рр. в косі постійно діяли від 2 до 5 таких каналів, які забезпечували стабільний та сприятливий для рибогосподарської діяльності гідролого-гідрохімічний режим. З 1992 по 1997 рр. канали не працювали.



**Рис. 1** – Схема розташування лиманів Тузлівської групи: 1 – л. Шагани з лиманами Магалевський (2), Мартаза (3) та Будури (4); 5 – л. Карачаус; 6 – л. Алібей; 7 – л. Хаджидер; 8 – л. Курудіол; 9 – л. Бурнас; 10 – л. Солоний (Базар'ян)

**Fig. 1** – Map that shows the location of the Tuzla group of lagoons: 1 – the Shahany Lagoon with adjoining Mahalevskiy (2), Martaza (3) and Budury Lagoons (4); 5 – the Karachaus Lagoon; 6 – the Alibey Lagoon; 7 – the Khadzhyder Lagoon; 8 – Lake Kurudiol; 9 – Lake Burnas; 10 – the Solonyi Lagoon (Lake Bazaryan)

В Одеському державному екологічному університеті (ОДЕКУ) у 2003-2005 рр. було виконано ряд науково-дослідних робіт, а саме «Розробка заходів щодо відновлення і підтримання сприятливих гідрологічного і гідрохімічного режимів в районі Тузлівської групи лиманів» [5], «Моделювання гідрологічного і гідрохімічного режимів Тузлівської групи лиманів, спрямованих на покращення їх екологічного стану» [6], на яких базуються публікації [7-11], а також проведені відповідні дослідження у 2014 р. [12]. Було встановлено, що головною гідроекологічною проблемою для вказаного лиманного комплексу є обміління і підвищення солоності вод до критичних значень в умовах відсутності або обмеженого водообміну з морем, що негативно впливає на біорізноманіття екосистеми та її біологічну продуктивність. Осолонення водойми призводить до перебудови біоценозів, докорінної зміни якісних і кількісних характеристик всіх складових кормової бази, збідніння видового складу іхтіофауни і зменшення рибопродуктивності [13].

Узагальнені відомості щодо мінливості солоності вод в лиманах Тузлівської групи у ХХІ ст. наведені в роботі [14]. У період 2007-2009 рр., за відсутності зв'язку лиманів з морем, солоність вод в лиманах Шагани і Алібей досягала 46-54 ‰, а в лимані Бурнас у серпні становила 68-88 ‰ [15].

У 2010 р., на місці спочатку невеликого, штучно створеного каналу на 24 км коси-пересипу (л. Шагани), утворилась широка та глибока прорва-проміна. Утворення прорви призвело до значного зниження солоності води в лиманах. Наприклад, у вересні 2010 р. в л. Бурнас рівень води підвищився на 0,85 м, а солоність води знизилась до 46-54 ‰ [15]. У 2015 р. прорва на 24-му кілометрі коси-пересипу була штучно перекрита. З цього часу зв'язок водойми з морем підтримувався через створений на 2-му кілометрі коси-пересипу (л. Бурнас) штучний обловно-запускний канал з проєктною шириною 15,0 м і відміткою дна мінус 1,0 м БС, який функціонував протягом декількох місяців навесні і восени. За свідченням [14], солоність вод наприкінці серпня-початку вересня 2020 р. дорівнювала 47-65 ‰ в л. Шагани, 60-63 ‰ – в л. Алібей та 44-64 ‰ – в л. Бурнас.

Зауважимо, що 2019-2020 рр. були дуже посушливими, з малою кількістю атмосферних

опадів і інтенсивним випаровуванням, а пропускна здатність каналу значно знижувалась через його замулення, а також наявність та особливості конструкції встановлених в ньому стаціонарних риболовецьких гард.

Режим рибогосподарського використання Тузлівської групи лиманів, який склався історично, полягав у штучному створенні в пересипу кількох каналів для з'єднання водойми з морем, які відкривались навесні – для зариблення і восени – для вилову товарної риби. За результатами досліджень ОДЕКУ, в роботах [5, 7, 10-12] був зроблений висновок, що в кліматичних умовах ХХ ст. такий режим був виправданим. Через канали відбувалось штучне наповнення водойми морською водою, що призводило до відносного зниження солоності вод в лиманах та забезпеченню в них сприятливих гідроекологічних умов.

Однак, зміна кліматичних умов (посилення посушливості клімату, збільшення дефіциту прісного водного балансу), які відбуваються в останні десятиріччя [16, 17], призвела до того, що традиційна система регулювання водообміну Тузлівської водойми з морем має наслідком формування багаторічної тенденції накопичення солей в лиманах та підвищення солоності води в них. В цьому контексті особливої актуальності набуває висновок, зроблений в [5] на підставі досліджень 2003 р.: необхідно забезпечити не тільки поповнення лиманів морською водою навесні і восени кожного року, але й забезпечити виведення солей з лиманів до моря, тобто щоб морська вода не тільки надходила до водойми, а й лиманні води виводились до моря. На підставі результатів математичного моделювання, із використанням гідродинамічної моделі МЕССА [5] було встановлено, що для забезпечення максимального промивання Тузлівської водойми морськими водами оптимальним є створення двох сполучних каналів в південній (л. Шагани) і північній (л. Бурнас) частинах піщаної коси-пересипу. Моделювання виконувалось за вітрових умов, які спостерігались у 2002 році на гідрометеорологічній станції Усть-Дунайськ. Відмітки рівня води в каналах з боку моря задавались на підставі результатів моделювання або незмінними [10-12].

З моменту отримання вищезгаданих результатів минуло багато часу, але проблема стабілізації гідрологічного режиму і гідроекологічних

умов в Тузлівській групі лиманів, шляхом забезпечення і регулювання їх водообміну з прилеглою частиною моря, досі остаточно не вирішена. За цей час були отримані нові, уточнені дані щодо просторового розподілу глибин в Тузлівських лиманах, змінювались умови їх водообміну з морем, значного розвитку здобули чисельні гідродинамічні моделі, які застосовуються для сценарного моделювання. Тому було прийняте рішення про доцільність адаптації до умов Тузлівських лиманів сучасної чисельної гідродинамічної моделі з інтегрованого пакета для моделювання Delft3D FM Suite 2D3D, розробки науково-дослідного інституту Deltares (м. Делфт, Нідерланди) [18]. У подальшому до основного гідротермодинамічного блоку пакету (D-Flow FM) можуть бути приєднані додаткові модулі для розрахунку транспорту наносів і деформацій дна (D-Morphology), моделювання якості вод (D-Water Quality) та ін.

*Мета статті* полягає у викладенні результатів адаптації сучасної чисельної гідродинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh до умов лиманів Тузлівської групи та застосування її для визначення ефективності різних варіантів забезпечення їх водообміну з морем на підставі результатів сценарного математичного моделювання. Зокрема, досліджуються варіанти функціонування відносно вузького з'єднувального каналу на 2-му км коси-пересипу (л. Бурнас) сумісно с прорвою, яка існувала до 2015 р.; широким контрольованим з'єднувальним каналом, замість прорви на 24-му км коси-пересипу (л. Шагани), додаткового (третього) вузького каналу на ділянці коси-пересипу, прилеглої до л. Алібей.

## 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для оцінки впливу на гідроекологічний стан основних лиманів Тузлівської групи, за різних умов їх водообміну з морем через прорви (промоїни) та канали в коси-пересипу, використовувалась сучасна чисельна гідродинамічна модель Delft3D Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) [19], яка базується на чисельному розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини на мілкій воді у наближенні Буссінеска. Система диференціальних рівнянь моделі складається з рівнянь руху (у горизонтальній площині), рівняння нерозривності, рівняння перенесення (тепла та солей), а також двопараметричної  $k-\epsilon$ -моделі турбулентності [20], яка замикає ці рівняння. Для рівняння

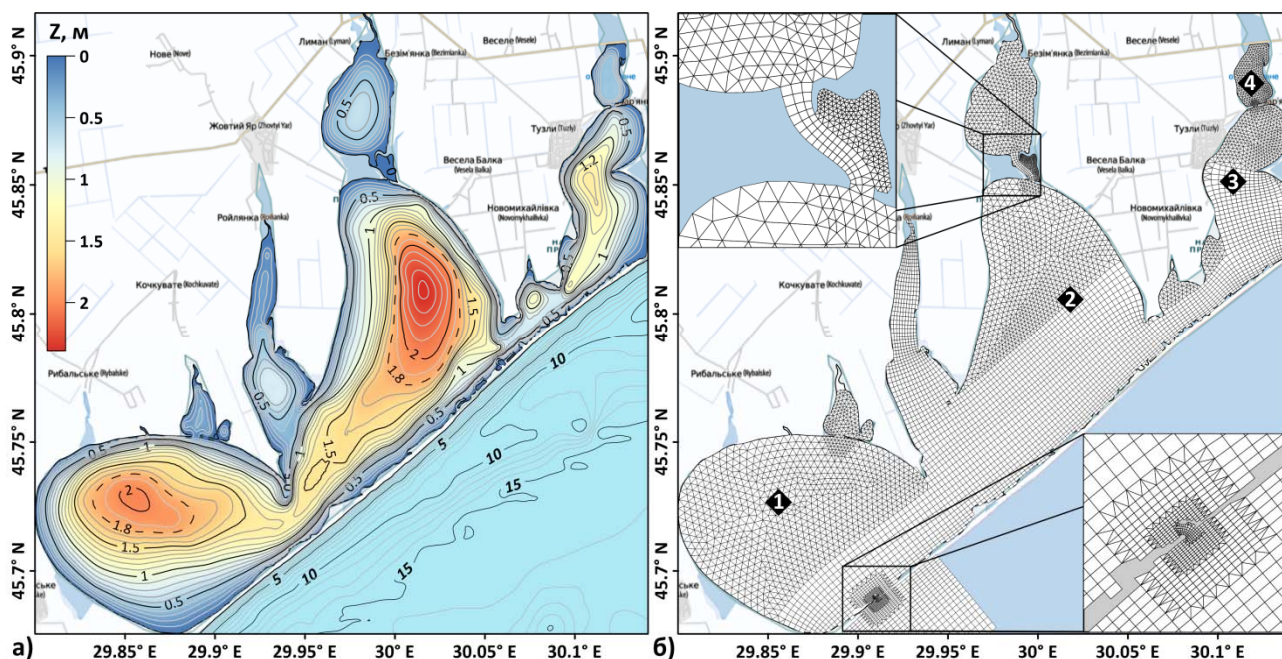
швидкості вертикального руху приймається гідростатичне наближення. Вертикальні компоненти векторів швидкості течії розраховуються через рівняння нерозривності. Рівняння стану морської води визначається за формулою ЮНЕСКО [21].

Модель D-Flow FM є подальшим розвитком гідротермодинамічного блоку Delft3D-FLOW інтегрованого пакета для моделювання Delft3D (версії 4.04.01) [18], яка при розрахунках використовує перевірені криволінійні розрахункові сітки у поєднанні із неструктурованими сітками. Це дозволяє більш точно описувати в моделі акваторію моря, що розглядається, включати до її складу різні за масштабом водні об'єкти складної (нерегулярної) просторової форми, збільшувати деталізацію результатів моделювання в необхідних областях при менших витратах комп'ютерного часу на проведення моделювання, у порівнянні з іншими гідродинамічними моделями реалізованими на неструктурованих сітках.

Для проведення модельних розрахунків, з метою адаптації моделі D-Flow FM до умов лиманів Тузлівської групи та її калібрування, була згенерована неструктурована розрахункова сітка, яка складалась з 7830 вузлів та 10412 розрахункових осередків (рис. 2б). Елементарні розрахункові осередки сітки мають змінні розміри в горизонтальній площині: від 18 м (в районах вузьких каналів, мілководних заток і проток) до 415 м. Сітка з високою точністю описує основні морфометричні особливості лиманів: конфігурацію берегової лінії, розташування місів, кіс, проток, каналів, розподіл глибин на акваторії лиманів.

У вертикальній площині в моделі задавались 10 розрахункових рівнів перемінної товщини, реалізовані в криволінійній  $\sigma$ -системі координат. Глибини в лиманах, приведені до позначки рівня мінус 0,4 м БС (рис. 2а), задавались на основі узагальнених даних промірів глибин, виконаних у різні роки фахівцями Одеського державного екологічного університету [5, 12] та Одеського національного університету ім. І.І. Мечнікова [15].

Моделювання виконувалось для гідрометеорологічних умов 2014 року, коли зв'язок лиманів



**Рис. 2** – Батиметрія лиманів Тузлівської групи та прилеглої морської акваторії (а). Розрахункова сітка, побудована для адаптації та калібрування моделі (б). На вставках показані: канал між лиманом Алібей та оз. Хадждидер (вверху зліва); проран між лиманом Шагани та морем (внизу справа). Цифрами 1-4 позначені контрольні (реперні) точки для аналізу результатів моделювання

**Fig. 2** – Bathymetry of the lagoons of Tuzla group and adjacent sea area (A). Computational mesh, created for model adaptation and calibration (B). Insets show the channel between the Alibey Lagoon and the Khadzhyder Lagoon (upper left) and the outlet to the sea from the Shahany Lagoon (lower right). Numbers 1-4 indicate control points for the analysis of model results

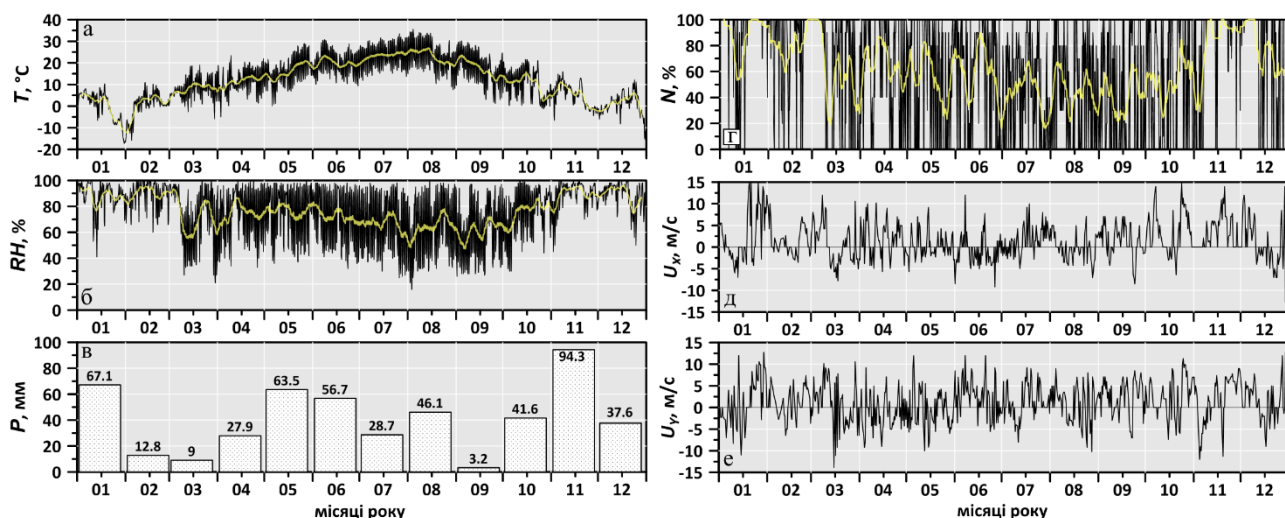
Тузлівської групи з морем здійснювався через розташовану на 24 км коси (л. Шагани) природну прорву шириною 150 м і глибиною 0,3-2,5 м (у поперечному розрізі) [12], утворену внаслідок розмиву спочатку невеликого, штучно створеного каналу. При розрахунках на верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області задавались: часова мінливість температури та відносної вологості повітря, кількості атмосферних опадів, відсоток хмарності – за даними спостережень на ГМС «Сарата» (рис. 3а-г).

Мінливість вітрових умов (рис. 3д, е) та синфазні з ними коливання рівня моря (із 6-годинною часовою дискретністю) на бічній відкритій морській межі розрахункової області задавалась за даними спостережень на прибережному гідрометеорологічному пості (МГП) «Царградське гирло» (рис. 4а). Мінливість температури та солоності морської води задавалась на всіх відкритих бічних границях моделі за даними МГП «Приморське-1». Використовувались середні декадні значення спостереженої на даному

посту температури води та значення 75% квантіля місячної мінливості солоності води, які були лінійно проінтерпольовані із 6-ти годинною дискретністю (рис. 4б, в).

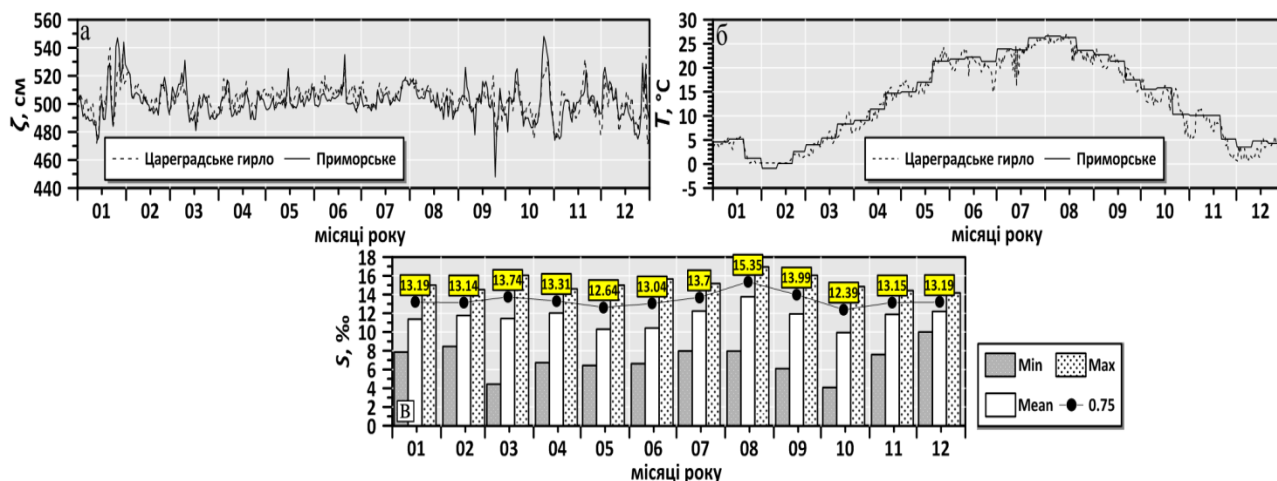
Початкова позначка рівня води у лиманах приймалася рівною відмітці рівня моря. Початкове значення солоності води в лиманах приймалося рівним 21, 22 і 23 ‰ для лиманів Шагани, Алібей і Бурнас відповідно.

Оскільки стаціонарні регулярні спостереження за мінливістю характеристик гідрологічного режиму лиманів Тузлівської групи (коливаннями рівня води, температури, солоності, течіями), у їх зв'язку з внутрішньо-річною мінливістю метеорологічних умов, відсутні, то для калібрування та верифікації модельних розрахунків використовувались доступні результати епізодичних нерегулярних досліджень різних установ, включно з даними натурних експедиційних спостережень за температурою, солоністю води в лиманах, течією води у прорані, виконаних фахівцями ОДЕКУ, зокрема, у 2014 р. [12].



**Рис. 3** – Мінливість температури, °C, (а) та відносної вологості повітря, %, (б), місячних сум атмосферних опадів, мм, (в), відсотка хмарності, %, (г) у 2014 р. за даними ГМС «Сарата»; зональних (д) та меридіональних (е) компонент вектору швидкості вітру, м/с, за даними ГМП «Цареградське гирло»

**Fig. 3** – Time series of air temperature, in °C, (A), relative humidity of air, in per cent, (B), monthly sums of atmospheric precipitation, in mm, (C), cloudiness percentage, in per cent, (D) measured in 2014 at the “Sarata” meteorostation; x- and y-components of wind vector, in m s<sup>-1</sup>, (E and F respectively) at the “Tsaregradske Hyrlo” tide gage



**Рис. 4** – Коливання рівня моря, см, (а), мінливість температури морської води, °C, (б) у 2014 р. за даними ГМП «Цареградське гирло» та «Приморське-1». Мінімальні, максимальні, середні та 75% (точки) значення солоності морської води, ‰, в різні місяці 2014 р. за даними ГМП «Приморське-1» (в)

**Fig. 4** – Time series of water level, in cm, (A) and sea water temperature, in °C, (B) measured in 2014 at the “Tsaregradske Hyrlo” (dashed line) and “Prymorske” (solid line) tide gages. Minimum, maximum, average (mean) and the upper quartile (dots) of sea water salinity, in ppt, measured at the “Prymorske” tide gage in 2014 (C)

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 5 наведені результати моделювання солоності вод в 4-х контрольних (реперних) точках на акваторії лиману (рис. 2б), які порівнювались з даними спостережень, виконаних у серпні 2014 р. Видно, що незважаючи на неточність завдання при моделюванні початкових значень солоності води в лиманах, мінливості гідрометеорологічних умов на границях розрахункової

області, отримана задовільна відповідність між спостереженими та розрахованими значеннями. Максимальна похибка знаходиться в межах 1 ‰ при діапазоні просторово-часової мінливості солоності в акваторії водойми протягом року 17-30 ‰. Деяке завищення модельованих значень солоності, порівняно зі спостереженими, може бути викликано неврахуванням при моделюванні надходження прісної води в лимани з їх водозбору зі стоком річок та водотоків.

Є дуже мало відомостей про особливості відгінно-нагінних коливань рівня води в лиманах Тузлівської групи. В [1] зазначається, що за даними спостережень, виконаних наприкінці 50-х – початку 60-х років ХХ ст., найбільші перепади рівня води спостерігаються між протилежними кінцями водойми за вітрів, спрямованих вздовж її великої осі. Зокрема, за вітрів північного – східно-північно-східного напрямку швидкістю 6-16 м/с, рівень води в північно-східній частині водойми знижується на 0,25-0,45 м, а в південно-західній – збільшується на 0,3-0,5 м, тобто амплітуда відгінно-нагінних коливань рівня води досягала 1,0 м. При такому поздовжньому ухлоні рівня відбувається оголення значних ділянок дна

навітряних районів водойми. Аналогічні результати отримані при моделюванні відгінно-нагінних коливань рівня води в лиманах Тузлівської групи за умов 2014 р. (рис. 6-7).

Як зазначалось раніше, солоність вод «закритих» лиманів північно-західного Причорномор'я та характеристики її мінливості є основним індикатором стабільності гідро-екологічних умов в них, чинником, який визначає розвиток біотичних складових їх екосистем, біорізноманіття та біопродуктивність [13]. У свою чергу, характер просторово-часової мінливості солоності вод в лиманах досліджуваного типу визначається величиною дефіциту їхнього річного прісного балансу та умовами водообміну з морем через канали і прорани.

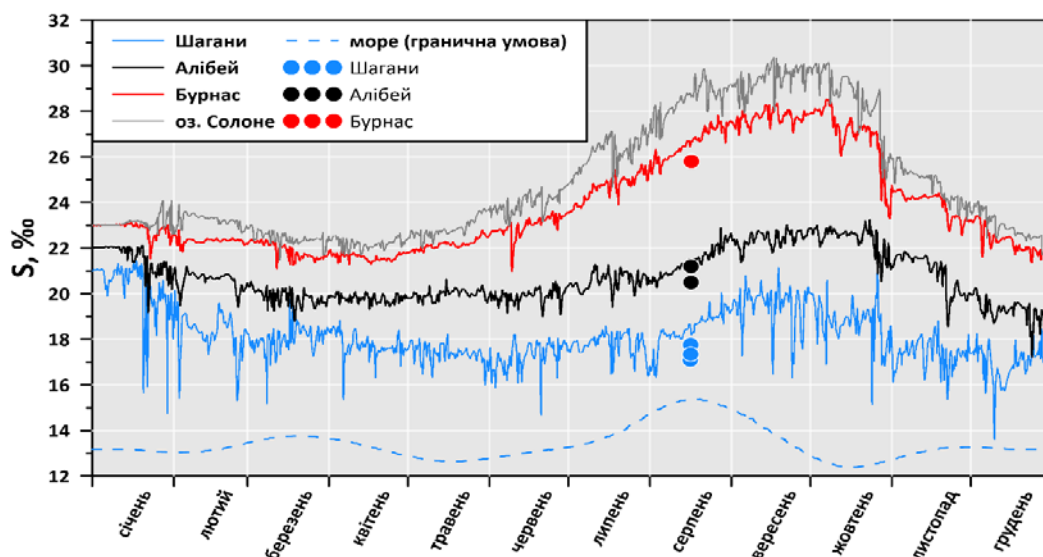


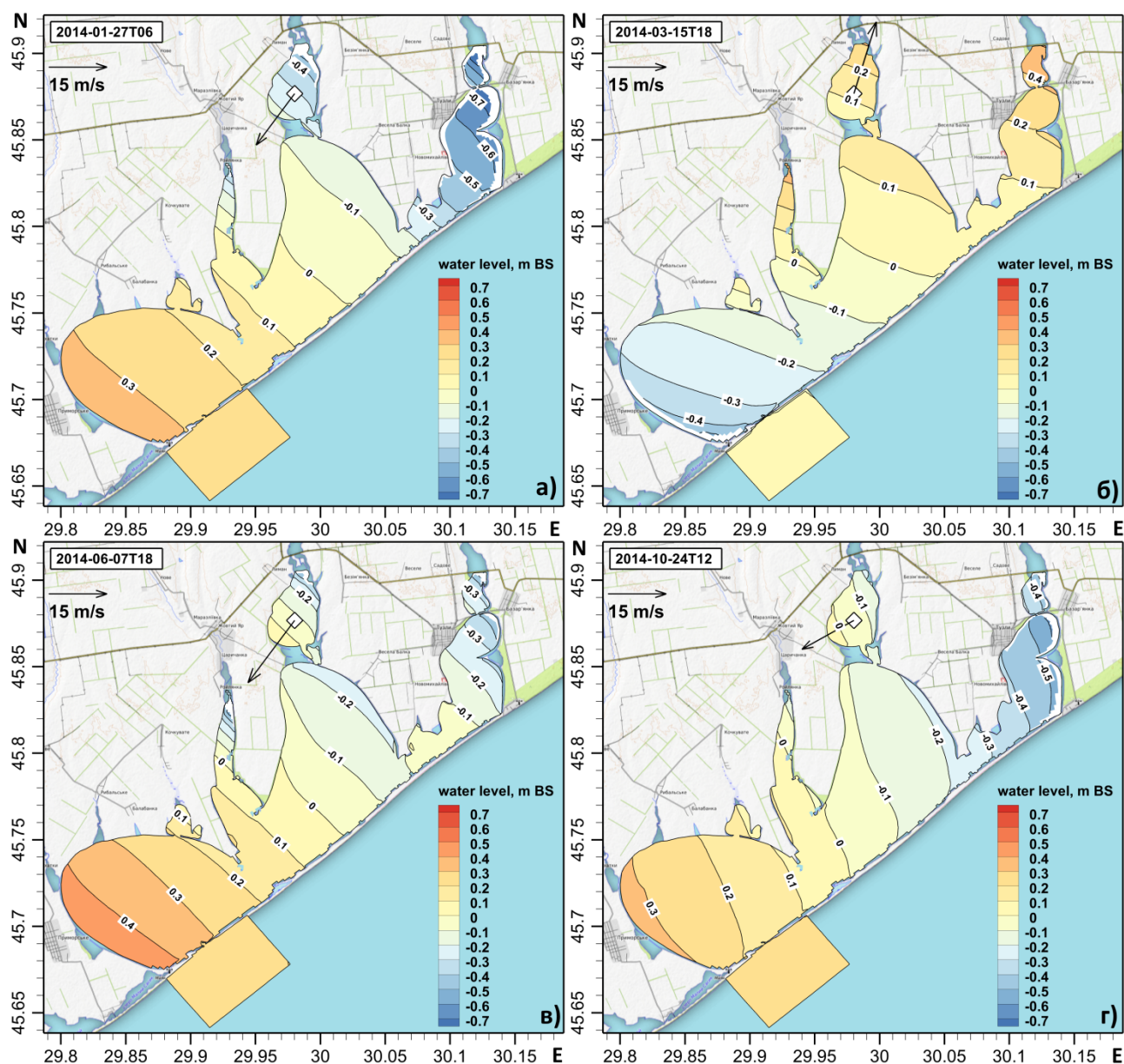
Рис. 5 – Солоність, ‰, поверхневого шару вод за результатами моделювання для 2014 року в різних контрольних точках акваторії лиману (криві) та згідно даних натурних спостережень 14-17.08.2014 р. (точки)

Fig. 5 – Measured (dots) and modelled (solid lines) water salinity, in ppt, in the upper layer of the lagoons in 2014 for different control points



Рис. 6 – Коливання рівня води, м БС, в лиманах Шагани та Бурнас у 2014 р. за результатами моделювання. Стрілки показують моменти часу значних відгінно-нагінних відхилень рівня води в лиманах, для яких побудовані поля просторової мінливості рівня

Fig. 6 – Time series of modelled water level, in m BS, in the Shahany and Burnas lagoons in 2014. Arrows indicate time points, corresponding to significant wind-induced set-down phenomena in the lagoons, for which the maps of spatial variability of water level are created



**Рис. 7** – Рівень води, м БС, в Тузлівських лиманах в моменти часу: а) 27.01.2014 р. 06:00; б) 15.03.2014 р. 18:00; в) 07.06.2014 р. 18:00; г) 24.10.2014 р. 12:00. Стрілка на карті показує напрям та швидкість вітру. Білим кольором позначені ділянки осушення акваторії лиманів внаслідок відгінних явищ

**Fig. 7** – Spatial variability of water level, in m BS, in the Tuzla group of lagoons at the following time points: 06:00 AM 27.01.2014 (A); 06:00 PM 15.03.2014 (B); 06:00 PM 07.06.2014 (C); 12:00 PM 24.10.2014 (D). The arrows on maps show wind direction and wind speed magnitude. Areas of drying of the lagoons water area due to set-down are marked with white

Вплив різних варіантів водообміну лиманів Тузлівської групи з морем, через штучно створені в косі канали, на просторово-часову мінливість солоності їхніх вод визначався на основі результатів сценарного чисельного моделювання. Додатково до описаного вище базового «0» варіанту, який відповідав умовам 2014 р., розглядалися такі варіанти забезпечення водообміну лиманів з морем (рис. 8):

1) *Варіант 1.* Додано один штучно створений канал в північній частині коси-пересипу,

прилеглий до л. Бурнас. Цей канал, шириною 15 м, функціонує безперервно протягом року. Параметри прорви в косі, прилеглої до л. Шагани (*варіант «0»*), залишаються незмінними.

2) *Варіант 2.* Два канали у косі-пересипу, що відокремлює Тузлівські лимани від моря: шириною 60 м – на ділянці прилеглий до л. Шагани (замість прорану), та шириною 15 м – на ділянці, прилеглий до л. Бурнас. Канали функціонують безперервно протягом року.



*Варіант 3.* Три канали у косі-пересипу: шириною 60 м – на ділянці, прилеглій до л. Шагани, та шириною по 15 м – на ділянках, прилеглих до лиманів Алібей і Бурнас. Канали функціонують безперервно протягом року.

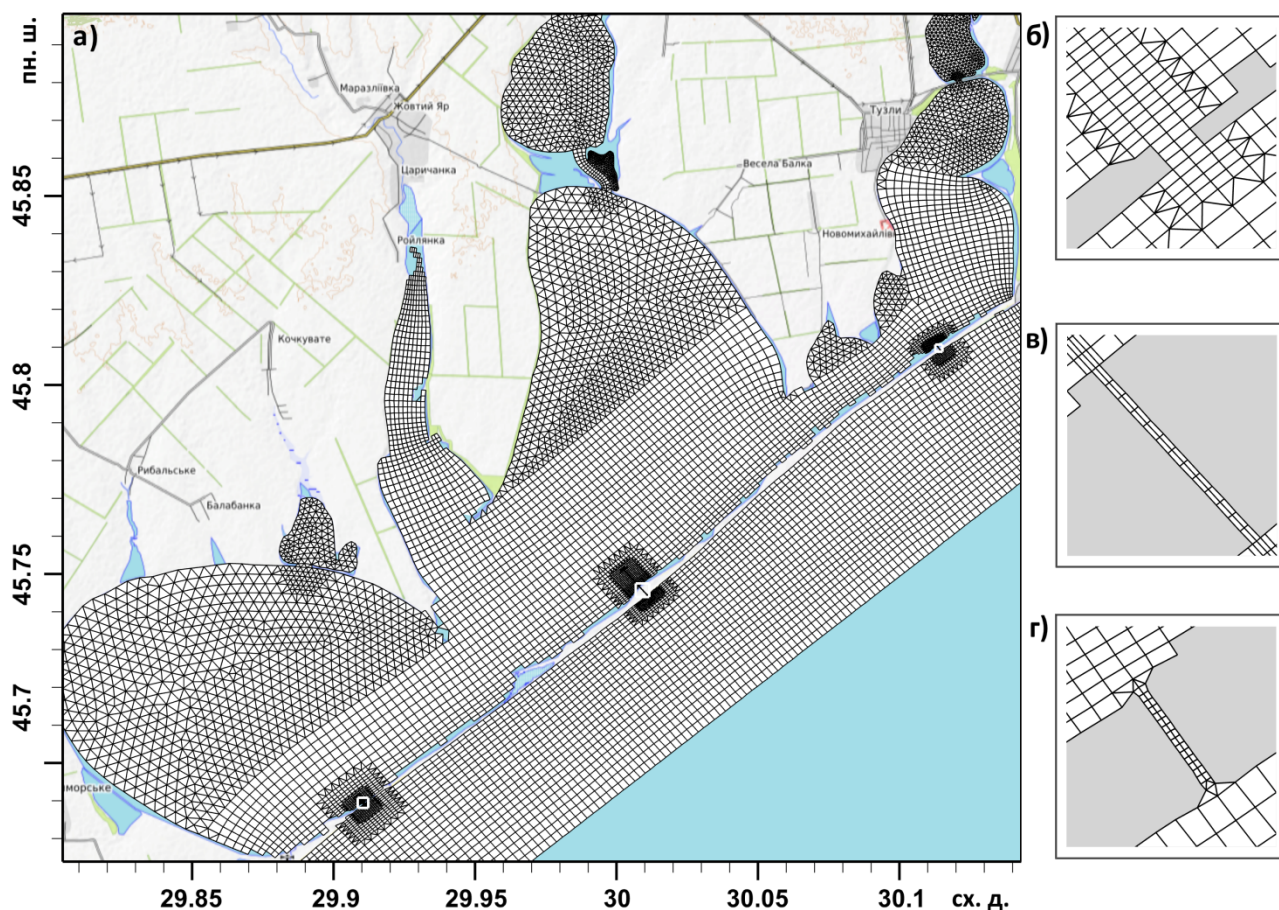
Схема розташування каналів в косі-пересипу Тузлівських лиманів та розрахункові сітки в них наведені на рис. 8.

Моделювання усіх варіантів здійснювалось за гідрометеорологічних умов 2014 р., описаних раніше.

Мета реалізації *варіанту 1* полягала у зниженні просторових градієнтів солоності води в акваторії групи лиманів шляхом зниження солоності води в лимані Бурнас-оз. Солоне, де вона у «0» варіанті в вересні-жовтні досягала значень 28-30 ‰ (рис. 5).

У *варіанті 2* створюється штучний канал шириною 60 м з відміткою дна мінус 1,0 м БС,

замість неконтрольованого широкого та глибокого прорану на ділянці коси-пересипу, прилеглої до л. Шагани. Доцільність моделювання цього варіанту визначається тим, що, за свідченням [22], функціонування неконтрольованих прорв призводить до інтенсивного надходження в лимани величезних обсягів піску та мулу, які забирає море з морського боку коси, прагнучі закрити таку проміну. В результаті, в лиманах відбувається замулення значних акваторій, включно з нерестовищами аборигенних видів риб, утворюються коси, мілководдя та острови, погіршується стан природної кормової бази, виникає загроза поступового руйнування морської коси-пересипу [22]. Тому підтримання постійного водообміну лиманів з морем через контрольовані і облаштовані, відповідно до встановлених вимог, штучні канали має свої переваги.

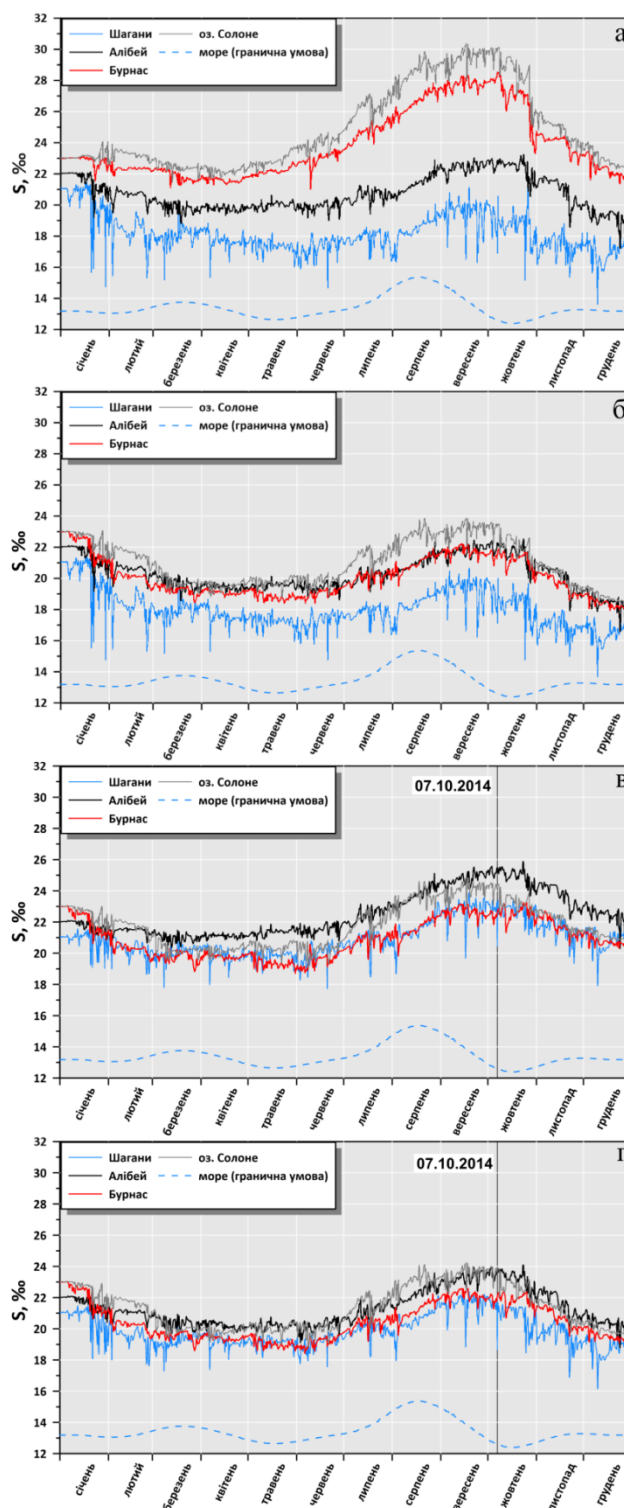


**Рис. 8** – Розрахункова сітка для акваторії Тузлівської групи лиманів у варіанті з трьома з’єднувальними каналами (а); вбудовані розрахункові сітки в каналах: б – л. Шагани; в – л. Алібей; г – л. Бурнас

**Fig. 8** – Computational mesh for the water area of the Tuzla group of lagoons in the variant with three connecting channels (A). Fragments of computational mesh in the channels near the Shahany Lagoon (B); the Alibey Lagoon (C); the Burnas Lagoon (D)

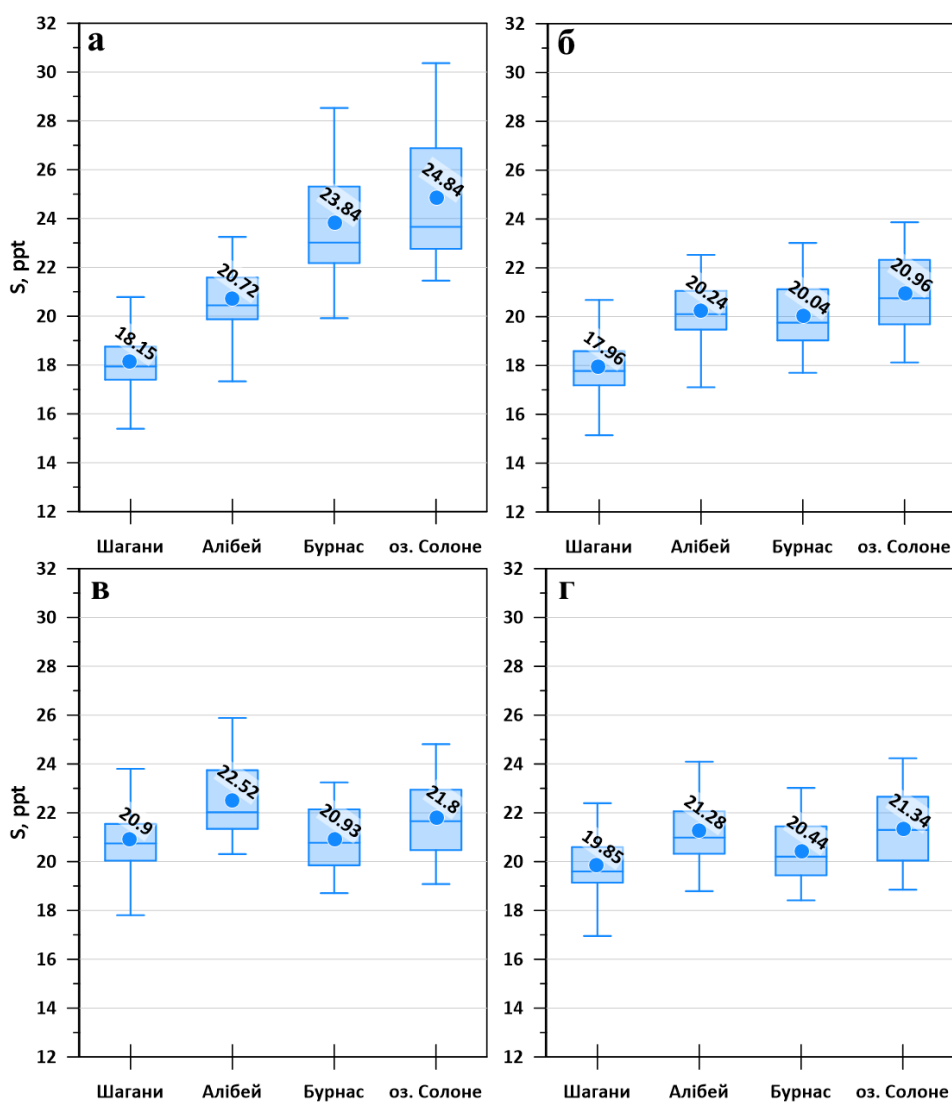
Доцільність моделювання *варіанту 3* визначається тим, що періодично виникає питання про можливість і доцільність створення не двох, а трьох і більше каналів у косі-пересипу для забезпечення стабілізації гідроекологічних умов в лиманах та підвищення їхньої рибопродуктивності. Однак, ще в [1] зазначалось, що необґрунтоване створення та функціонування необлаштованих обловно-запускних каналів в різних районах коси-пересипу збільшує загрозу розмиву окремих її ділянок, утворення широких неконтрольованих промоїн, порушує умови істотного водообміну і, як наслідок, інтенсивність рибоходу восени та навесні. На рис. 9-10 показані результати моделювання річного циклу солоності води в лиманах при вищезазначених варіантах водообміну. З рис. 9 видно, що на кінець року моделювання солоність вод в контрольних точках лиманів Шагани, Алібей, Бурнас (17, 19 і 22 ‰ у варіанті «0») зміниться: до 17-18 ‰ – у варіанті 1; до 21 ‰ в лиманах Шагани, Бурнас і 22 ‰ в л.Алібей – у варіанті 2; до 19 ‰ в лиманах Шагани, Бурнас і 20 ‰ в л.Алібей – у варіанті 3. Із порівняння цих значень з початковими (21, 22 і 23‰ для лиманів Шагани, Алібей і Бурнас, відповідно) можна зробити висновок, що у всіх розглянутих варіантах відбувається стабілізація гідроекологічних умов в лиманах, оскільки значення солоності на кінець року менші або дорівнюють (у варіанті 2 л. Алібей) початковим.

В цілому, результати, наведені на рис. 9-10, свідчать, що наявність двох штучних з'єднувальних каналів в косі-пересипу, що відокремлює Тузлівські лимани від моря, шириною 60 м в л.Шагани і 15 м в л. Бурнас, які функціонують цілорічно, є достатньою умовою для стабілізації в них гідроекологічних умов. І це незважаючи на те, що витрати води через штучний канал в л. Шагани значно зменшаться, порівняно з витратами води через промоїну, яка діяла до 2015 р. (рис. 11). В той же час, додаткове створення третього каналу в косі-пересипу на ділянці, прилеглій до л. Алібей, у варіанті 3, не дає значущого ефекту порівняно з варіантом 2, окрім зменшення максимальних значень солоності у вересні-жовтні в л. Алібей з 24 до 22 ‰, що не є принциповим.



**Рис. 9** – Мінливості солоності, ‰, поверхневого шару вод в контрольних точках на акваторії Тузлівських лиманів за різних варіантів водообміну з морем: а – Варіант 0; б – Варіант 1; в – Варіант 2; г – Варіант 3

**Fig. 9** – Time series of modelled water salinity, in ppt, of the sub-surface water layer in the control points at the Tuzla lagoons water area under various variants of water exchange with the sea: Variant 0 (A); Variant 1 (B); Variant 2 (C); Variant 3 (D)



**Рис. 10** – Характеристики просторово-часової мінливості солоності, ‰, у поверхневому шарі вод, в контрольних точках акваторії Тузлівських лиманів, за різних варіантів водообміну з морем: а – Варіант 0; б – Варіант 1; в – Варіант 2; г – Варіант 3. Представлені мінімальні, максимальні, медіани, середні (точки) значення, а також значення 0,25- та 0,75-квартілей

**Fig. 10** – Description of spatio-temporal variability of water salinity, in ppt, in the sub-surface layer of water area of the Tuzla group of lagoons (in control points) under different variants of water exchange with the sea: Variant 0 (A), Variant 1 (B), Variant 2 (C), Variant 3 (D). Minimum, maximum, median, average (dots) values are shown, as well as the lower and the upper quartiles

На рис. 12 наведені приклади циркуляції вод в лиманах Тузлівської групи при реальних вітрових ситуаціях 15.03.2014 та 24-25.10.2014 р., за яких мали місце значні відгінно-нагінні відхилення рівня води в лиманах від незбуреного вітром стану (рис. 7б, г), та течій в каналах для варіанту 2. Видно, що у разі функціонування двох з'єднувальних каналів на ділянках косипересипу, прилеглих до лиманів Шагани і Алібей, в них виникають різноспрямовані потоки води при поздовжніх відносно великої осі

водойми вітрах. В періоди виникнення значних відгінно-нагінних коливань рівня води, в лиманах Тузлівської групи забезпечується інтенсивна промивка водойми морськими водами з солоністю нижчою ніж в лиманах, що запобігає накопиченню в них солей.

Різницю у просторовому розподілі солоності вод в акваторії лиманів у варіантах 2 та 3 ілюструють результати моделювання, наведені на рис. 13.

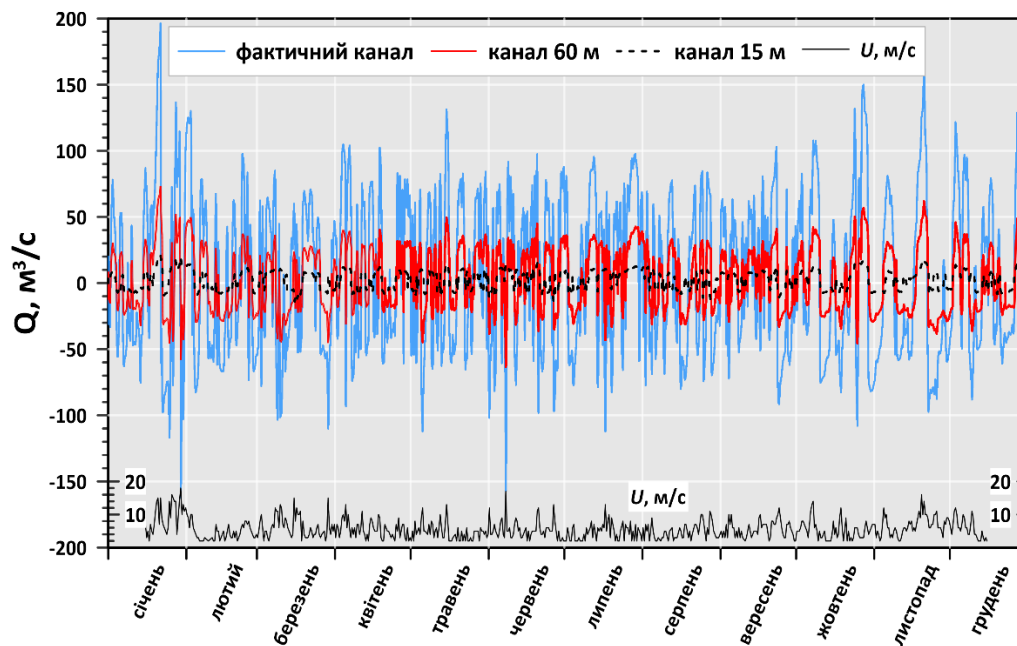


Рис. 11 – Мінливість витрат води,  $\text{m}^3/\text{c}$ , в каналах, які з'єднують Тузлівські лимани з морем, та модуля швидкості вітру,  $\text{m}/\text{c}$ , протягом року

Fig. 11 – Time series of modelled water discharge, in  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ , in the channels, and wind speed magnitude, in  $\text{m s}^{-1}$ , during the year

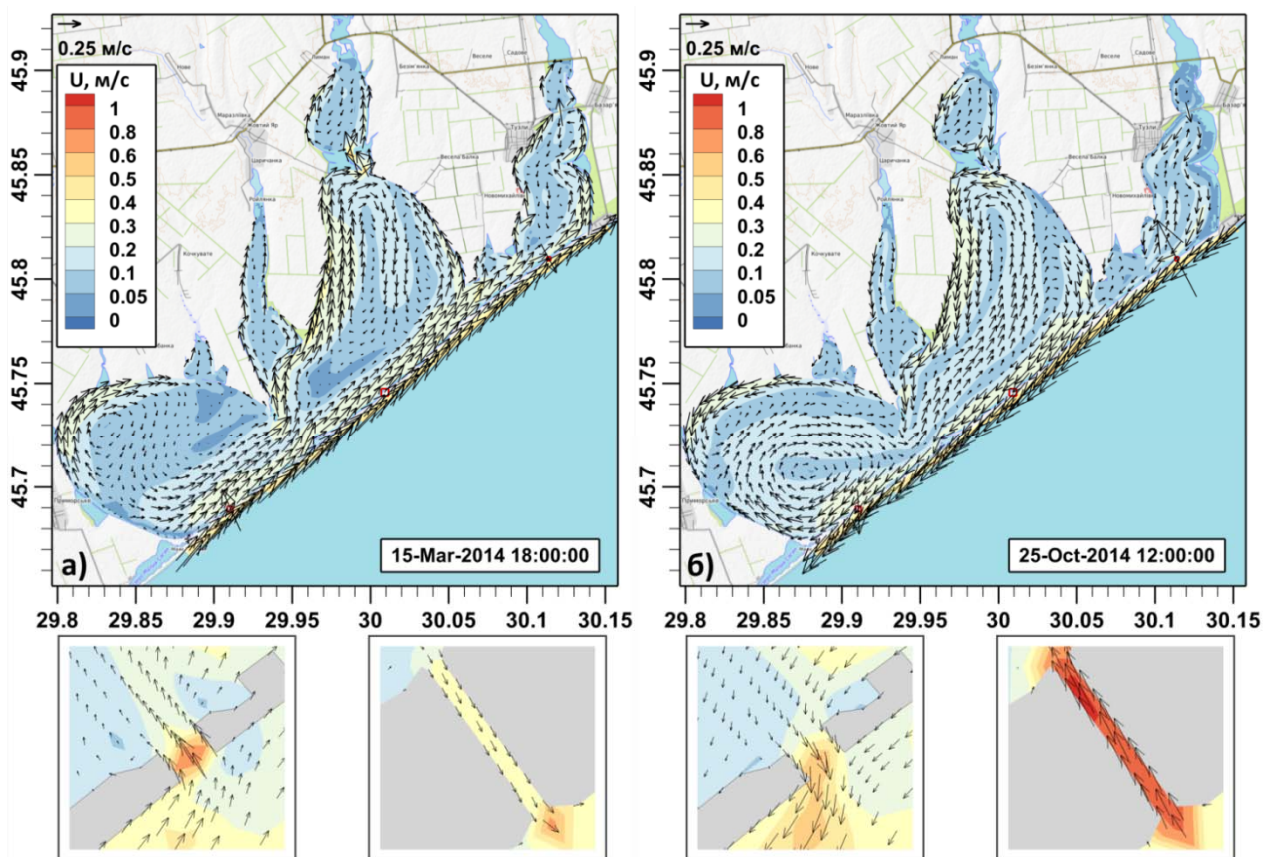
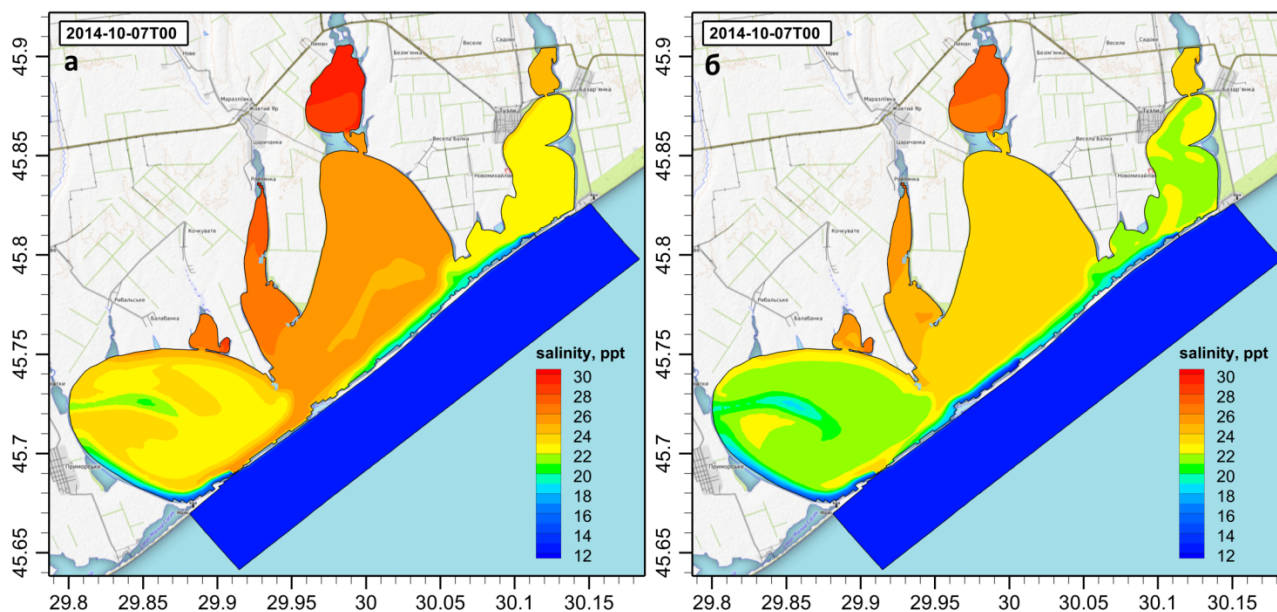


Рис. 12 – Просторовий розподіл осереднених за глибиною течій,  $\text{m}/\text{c}$ , в акваторії Тузлівських лиманів (зверху) та в з'єднувальних каналах (знизу) (варіант 2): а) 15.03.2014 18:00; б) 25.10.2014 12:00

Fig. 12 – Spatial distribution of depth-averaged flow velocity, in  $\text{m s}^{-1}$ , in the water area of the Tuzla group of lagoons (upper) and in channels (lower) at time-points 06:00 PM 15.03.2014 (A) and 12:00 PM 25.10.2014 (B) under variant 2 of functioning of interconnecting channels



**Рис. 13** – Просторовий розподіл солоності поверхневого шару вод, ‰, в акваторії Тузлівської групи лиманів в момент часу 07.10.2014 р. 00:00, у варіантах 2 (а) і 3 (б) функціонування з'єднувальних каналів

**Fig. 13** – Spatial distribution of salinity, in ppt, in the sub-surface layer of water area of the Tuzla group of lagoons at time-point 12:00 AM 07.10.2014 under variants 2 (A) and 3 (B) of functioning of interconnecting channels

Для визначення часу водооновлення лиманів Тузлівської групи та їхніх ділянок морськими водами, які надходять до них через з'єднувальні канали, моделювалось проникнення у водойму домішки нейтральної плавучості, концентрація якої в морській воді приймалася рівною одній умовній одиниці, а в лиманах 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, представлена у частках одиниці. Досягнення верхньої межі в 1,0 ум. од. відповідає повному водооновленню в розрахунковій точці в результаті надходження морських вод.

Результати розрахунків динаміки об'ємної концентрації морської води в реперних точках основних лиманів Тузлівської групи, у разі реалізації варіантів 2 і 3, показані на рис. 14. Вони свідчать, що час повного водооновлення лиману Шагани складе близько 8 місяців, а лиманів Алібей і Бурнас – 10 місяців у варіанті 3, і 12 місяців – у варіанті 2.

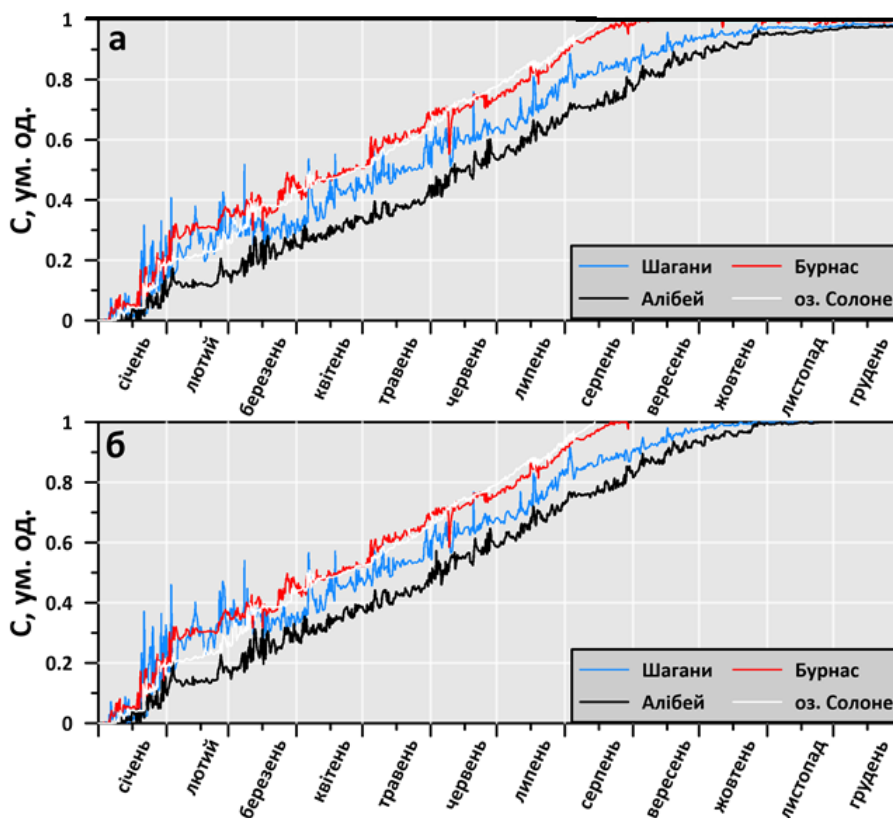
#### 4. ВИСНОВКИ

Результати моделювання динаміки вод, відгінно-нагінних коливань рівня води, річного циклу мінливості солоності води в лиманах Туз-

лівської групи, отримані із використанням сучасної чисельної гідродинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh за гідрометеорологічних умов 2014 р. свідчать, що оптимальне вирішення проблеми стабілізації гідроекологічного режиму водойми полягає в забезпеченні постійного протягом року різноспрямованого водообміну з морем через два штучних з'єднувальних канали в косі-пересипу з відмітками дна мінус 1,0 м БС, шириною 60 м – для л. Шагани та 15 м – для л. Бурнас. В цьому разі не буде відбуватись засолення водойми у багаторічній перспективі. Час повного водооновлення морською водою лиману Шагани становить близько 8 місяців, а лиманів Алібей і Бурнас – 12 місяців.

В результаті розрахунків встановлено, що створення додаткового, третього каналу на ділянці коси-пересипу прилеглий до л. Алібей не дає значущого ефекту порівняно з варіантом функціонування двох каналів, окрім зменшення максимальних значень солоності у вересні-жовтні в л. Алібей з 24 до 22 ‰, що не є принциповим.

У подальшому гідротермодинамічний блок D-Flow FM пакету моделей Delft3D може бути доповнений модулями для розрахунку транспорту наносів і деформацій дна (D-Morphology), моделювання якості вод (D-Water Quality) і



**Рис. 14** – Зміни концентрації консервативної домішки, в умовних одиницях (об’ємної концентрації морської води в частках від одиничного об’єму лиманних вод), яка надходить до лиманів з морськими водами у варіантах 2 (а) і 3 (б)

**Fig. 14** – Changes in concentration of conservative substance, in arbitrary units (volume concentration of sea water in parts of unit volume of lagoon waters), which comes to the lagoons with sea water under variants 2 (A) and 3 (B)

використаний для оцінки інтенсивності занесення/розмиву з’єднувальних каналів, ерозії/абразії дна на різних ділянках акваторії лиманів, біопродуктивності та якості вод їхніх вод за різних варіантів водного та екологічного менеджменту.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенгурт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов одесских лиманов: монография. Киев : Наукова думка, 1974. 217 с.
2. Старушенко Л. И., Бушуев С. Г. Причерноморские лиманы Одещины и их рыбохозяйственное использование: монография / Оф ИнБЮМ. Одесса: Астропринт, 2001. С.32-43.
3. Лиманно-устьевые комплексы Причерноморья: географические основы хозяйственного освоения / под ред. Г.И. Швевса. Ленинград: Наука, 1988. 303 с.
4. Шек П.В. Ихтиофауна водоемов Национального природного парка "Тузловские лиманы" и ее рыбохозяйственное использование. *Рибогосподарська наука України*. 2015. 2. С. 5-19.
5. Розробка заходів щодо відновлення і підтримання сприятливих гідрологічного і гідрохімічного режимів в районі Тузлівської групи лиманів : звіт про НДР заключний. ДР № 0103U006209 / наук. кер. Є. Д. Гопченко; база даних УкрНТЕІ; бібл. Од. держ. еколог. ун-ту. 2003. 158 с.
6. Моделювання гідрологічного і гідрохімічного режимів Тузлівської групи лиманів, спрямованих на покращення їх екологічного стану. : звіт про НДР заключний. ДР № 0104U010367 / наук. кер. Є. Д. Гопченко; база даних УкрНТЕІ; бібл. Од. держ. еколог. ун-ту. 2004. 88 с.
7. Гопченко Е. Д., Тучковенко Ю. С. Сценарное моделирование водно-солевого режима Тузлівских лиманов. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2003. Вып.10. С. 243 - 255.
8. Стабилизация гидрологического и гидрохимического режимов Тузлівских лиманов путем регулирования водообмена с морем / Гопченко Е.Д., и др. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2005. Вип.1. С. 187 - 194.
9. Управление качеством вод Причерноморских лиманов и Придунайских озер путем регулирования водного баланса / Иванов В. А. и др. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное*

- использование ресурсов шельфа. 2006. Вып. 14. С. 93 - 106.
10. Иванов В. А., Тучковенко Ю. С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем: монография / Морской гидроф. ин-т НАН Украины; Одес. гос. экол. ун-т. Севастополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
  11. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья : монография / под ред. Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко; Одесский государственный экологический университет. Одесса : ТЕС, 2012. 224 с.
  12. Стабилизация гидроэкологического режима Тузовской группы лиманов путем регулирования водообмена с морем (науч. рук. Ю. С. Тучковенко). Отчет про научно-исследовательскую работу / Одесский государственный экологический университет. 2014. 70 с.
  13. Шекк П. В. Екологічні чинники формування природної продуктивності водойм північно-західного Причорномор'я. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. 2015. 1 (8). С. 45-53.
  14. Попова О. М. Просторова динаміка солоності акваторій Національного природного парку «Тузлівські лимани» за екстремальних умов 2020 року. *Академіку Л.С. Бергу – 145 лет: сборник научных статей*. ISBN 978-9975-3404-9-6. Бендеры: Есо-TIRAS, 2021. С.437-440.
  15. Шуйский Ю. Д., Выхованец Г. В. Природа Причерноморских лиманов : монография. Одесса: Астропринт, 2011. 276 с.
  16. Тучковенко Ю. С., Хохлов В. М., Лобода Н. С. Оцінка впливу зміни клімату на складові прісного водного балансу лиманів північно-західного Причорномор'я. *Другий Всеукраїнський гідрометеорологічний з'їзд: тези доповідей, 7-9 жовтня*. Одеса, ISBN 978-966-186-163-2, 2021. С. 209-211.
  17. Тучковенко Ю. С., Лобода Н. С. Влияние изменений климата на стратегию водного менеджмента лагун северо-западного Причерноморья. *Перший Всеукр. гідрометеорологічний з'їзд з міжнародною участю: тези доповідей* (Одеса, 22-23 березня 2017 р.). Одеса: ТЕС, 2017. С. 312 - 313.
  18. Deltares. (2021). 3D/2D modelling suite for integral water solutions Delft3D. Functional Descriptions. Deltares systems, version: 2.20, SVN revision: 52614. URL: [https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-Functional\\_Specifications.pdf](https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-Functional_Specifications.pdf) (дата звернення: 03.12.2021).
  19. Deltares. (2021). D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 2022.02, SVN revision: 73609. 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: 05.11.2021).
  20. Burchard H., Baumert H. On the performance of a mixed layer model based on the k-ε turbulence closure. *Journal of Geophysical Research*. 1995. 100. Pp. 8523-8540.
  21. Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater / Millero Frank J. et al. *Unesco technical papers in marine science*, 1981. 38. 192p.
  22. Шекк П. Тузовские лиманы, каналы, прорвы и кефалевый промысел. *Вечерняя Одесса*, №134-135 (10981-10982), 10 декабря 2020 г. URL: <http://vo.od.ua/rubrics/ehkoklub/45582.php> (дата звернення 04.12.2021 р.)

## REFERENCES

1. Rozengurt, M. Sh. (1974). *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktsii prirodnykh resursov odesskikh limanov [Hydrology and prospects for the reconstruction of the natural resources of the Odessa limans]*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russ.)
2. Starushenko, L. I. & Bushuev, S. G. (2001). *Prichernomorskie limany Odeshchiny i ikh rybokhozyaystvennoe ispol'zovanie [Black Sea region limans of Odeshchina and their fishery use]*. Odessa Branch of Institute of Biology of Southern Seas. Odesa: Astroprint. (in Russ.)
3. Shvebs, G. I. (ed.). (1988). *Limanno-ust'evye komplekсы Prichernomor'ya: geograficheskie osnovy khozyaystvennogo osvoeniya [Liman-estuarine complexes of the Black Sea region: geographical bases of economic development]*. Leningrad: Nauka. (in Russ.)
4. Shekk, P. V. (2015). Ikhtiofauna vodoemov Natsional'nogo prirodnogo parka "Tuzlivskie limany" i ee rybokhozyaystvennoe ispol'zovanie [Ichthyofauna of water bodies of the National Natural Park "Tuzlovskiy Limany" and its fishery use]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy [Fisheries science of Ukraine]*, 2, pp. 5-19. (in Russ.)
5. Hopchenko, E. D. (scient. chief) (2003). *Development of measures to restore and maintain favorable hydrological and hydrochemical regimes in the Tuzla group of lagoons. Final Report*. State Registration No. 0103U006209. UkrSTEI database, Library of Odessa State Environmental University. (in Ukr.)
6. Hopchenko, E. D. (scient. chief) (2004). *Modelling of hydrological and hydrochemical regimes of the Tuzla group of lagoons aimed at improving their ecological condition. Final Report*. State Registration No. 0104U010367. UkrSTEI database, Library of Odessa State Environmental University. (in Ukr.)
7. Hopchenko, E. D. & Tuchkovenko, Yu. S. (2003). Stenarnoe modelirovanie vodno-solevogo rezhima Tuzlovskikh limanov [Scenario modeling of the water-salt regime of the Tuzlovsky lagoons]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources]*, 10, pp. 243-255. (in Russ.)
8. Hopchenko, E. D., Tuchkovenko, Yu. S., Serbov, N. G. et al. (2005). Stabilizatsiya gidrologicheskogo i gidrokhimicheskogo rezhimov Tuzlivskikh limanov putem regulirovaniya vodoobmena s morem [Stabilization of hydrological and hydrochemical regimes of Tuzla lagoons by regulating water exchange with the sea]. *Visnik Odes'kogo derzavnogo ekolohichnogo universitetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 1, pp. 187-194.

- (in Russ.)
9. Ivanov, V. A., Hopchenko, E. D., Tuchkovenko, Yu. S. et al. (2006). Upravlenie kachestvom vod Prichernomorskikh limanov i Pridunayskikh ozer putem regulirovaniya vodnogo balansa. [Water quality management of the Black Sea lagoons and Danube lakes by regulating the water balance]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources]*, 14, pp. 93-106. (in Russ.)
  10. Ivanov, V. A., & Tuchkovenko, Yu. S. (2006). *Prikladnoe matematicheskoe modelirovanie kachestva vod shel'fovyykh morskikh ekosistem [Applied mathematical water-quality modeling of shelf marine ecosystems]*. Marine Hydrophysical Institute of NASU, Odessa State Environmental University. Sevastopol: SPC EKOSI-Gidrofizika Publ. (in Russ.)
  11. Tuchkovenko, Yu. S., Hopchenko, E. D. (eds). (2012). *Aktual'nye problemy limanov severo-zapadnogo Prichernomor'ya [Actual problems of lagoons of the northwestern Black Sea region]*. Odessa State Environmental University. Odessa: TES Publ. (in Ukr.)
  12. Tuchkovenko, Yu. S. (scient. chief) (2014). *Stabilization of the hydroecological regime of the Tuzlovskaya group of lagoons by regulating water exchange with the sea. Scient. Report*. Odessa State Environmental University. 70 p. (in Ukr.)
  13. Shekk, P. V. (2015). Ekologichni chynnyky formuvannya pryrodnoi produktyvnosti vodoim pivnichno-zakhidnoho Prychornomoria [Ecological factors of formation of natural productivity of reservoirs of the north-western Black Sea coast]. *Ekologichni nauky [Ecological Sciences]*, 1 (8), pp. 45-53. (in Ukr.)
  14. Popova, O. M. (2021). [Spatial dynamics of salinity of the waters of the National Natural Park “Tuzla Limans” under extreme conditions in 2020]. *Akademiku L.S. Bergu – 145 let: sbornik nauchnykh statey [Academician L.S. Berg is 145 years old: a collection of scientific articles]*. Bendery, pp. 437-440. (in Ukr.)
  15. Shuyskiy, Yu. D. & Vykhovanets, G. V. (2011). *Priroda Prichernomorskikh limanov [The nature of the Black Sea limans]*. Odessa: Astroprint. (in Russ.)
  16. Tuchkovenko, Yu. S., Khokhlov, V. M. & Loboda, N. S. (2021) [Assessment of the impact of climate change on the components of the fresh water balance of the lagoons of the north-western Black Sea coast]. *Tezy dopovidei 2th Vseukrainskoho hidrometeorologichnoho zizdu [Theses of reports of the Second All-Ukrainian Hydrometeorological Congress]*, 7-9 October. Odessa, pp. 209-211. (in Ukr.)
  17. Tuchkovenko, Yu.S. & Loboda, N.S. (2017). [Impact of the climate change on the strategy of water management of lagoons of the Northwestern Black Sea]. *Tezy dopovidei 1th Vseukrainskoho hidrometeorologichnoho zizdu z mizhnarodnoiu uchastiu [Theses of reports of the First All-Ukrainian Hydrometeorological Congress with International Participation]*, 22-23 March. Odessa, pp. 312–313. (in Ukr.)
  18. Deltares. (2021). 3D/2D modelling suite for integral water solutions Delft3D. Functional Descriptions. Deltares systems, version: 2.20, SVN revision: 52614. Available at: [https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-Functional\\_Specifications.pdf](https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-Functional_Specifications.pdf) (Accessed: 03.12.2021).
  19. Deltares. (2021). D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 2022.02, SVN revision: 73609. 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: 05.11.2021).
  20. Burchard, H. & Baumert, H. (1995) On the performance of a mixed layer model based on the k-ε turbulence closure. *Journal of Geophysical Research*, 100, pp. 8523-8540.
  21. Millero, Frank, J et al. (1981). Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater. *Unesco technical papers in marine science*.
  22. Shekk, P. V. (10.12.2020) Tuzlovskie limany, kanaly, prorvy i kefalevyy promysel [Tuzla lagoons, canals, outlets and mullet fishing]. *Vechnyaya Odessa [Evening Odessa]*, 134-135 (10981-10982). Available at: <http://vo.od.ua/rubrics/ehkoklub/45582.php> (Accessed: 04.12.2021) (in Russ.)

## MODELING OF VARIABILITY OF HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE TUZLA GROUP OF LAGOONS UNDER VARIOUS VARIANTS OF THEIR WATER EXCHANGE WITH THE SEA

**Yu. S. Tuchkovenko, D. V. Kushnir**

*Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, tuch2001@ukr.net,  
<https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

The article is devoted to solving the problem of stabilization of hydrological regime and hydroecological conditions of the Tuzla group of lagoons located in the central part of the Danube-Dniester interfluvium by ensuring and regulating their water exchange with the open sea through artificially created channels in the barrier beach that separates the water body from the sea.

The research presents the results of adaptation of the well-known modern numerical



hydrodynamic model Delft3D Flow Flexible Mesh to the conditions of the Tuzla group of lagoons, as well as the results of its application to determine the effectiveness of various variants for ensuring water exchange with the sea based on the outcomes of scenario mathematical modeling.

In particular, the following variants of channels functioning were studied: (1) a relatively narrow connecting channel at the 2nd km of the barrier beach (near the Burnas Lagoon) together with a wide and deep outlet that existed before 2015 at the 24th km of the barrier beach (near the Shagany Lagoon); (2) a wide controllable connecting channel in the Shagany Lagoon placed on the outlet, alongside with the above-mentioned channel in the Burnas Lagoon; (3) an additional (third) narrow channel at the strip of the barrier beach near the Alibey Lagoon.

The characteristics of the annual cycle of water salinity spatio-temporal variability were used as indicators of the effectiveness of management decisions for ensuring the stability of the lagoons' hydro-ecological conditions.

Based on the analysis of the scenario modeling results it was concluded that the optimum solution of the problem related to stabilizing the hydro-ecological regime of the water body consists in ensuring the constant multidirectional water exchange with the sea through two artificial connecting channels in the barrier beach (both with bottom marks of minus 1.0 m (Baltic Height System) and 60 m and 15 m wide for the Shagany Lagoon and the Burnas Lagoon respectively) throughout the year. This will deny any salinization of the water body over the long term.

For the specified variant the time of complete water renewal with sea water for the main lagoons of the Tuzla group would constitute 8 and 12 months for the Shagany Lagoon and the Alibey/Burnas Lagoons respectively.

**Keywords:** Tuzlivski Lagoons; water salinity; water exchange with the sea; scenario modeling; water renewal

*Подання до редакції : 01. 06. 2022*

*Надходження остаточної версії : 06. 06. 2022*

*Публікація статті : 07. 07. 2022*