

УДК 551.582 + 551.468

## ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ВОДНИЙ БАЛАНС КВАЗІЗАКРИТИХ ЛИМАНІВ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я

Ю. С. Тучковенко, В. М. Хохлов, Н. С. Лобода

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

В статті досліджується вплив регіональних змін клімату, які вже відбулися та очікуються у найближчому майбутньому, на складові річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Ці лимани на теперішній час не мають постійного зв'язку з морем, а лише епізодично з'єднуються з ним штучно створеними каналами, протоками або іншими водопровідними гідротехнічними спорудами. Як показник чутливості екосистем таких лиманів до змін клімату використовується величина дефіциту їхнього річного прісного водного балансу. Ті з лиманів, які найбільш чутливі до зміни регіональних кліматичних умов, потребують розробки та реалізації планів дій для досягнення та підтримання їхнього "доброго" екологічного стану в першу чергу.

Отримані оцінки кліматичних змін середньобаторічних значень метеорологічних характеристик в північно-західному Причорномор'ї, які визначають складові водного балансу лиманів, для сучасного періоду 2000-2018 рр. (за даними спостережень на прибережних метеорологічних станціях) та майбутнього 2021-2050 рр., порівняно з періодом 1961-1990 рр. (за даними Кліматичного кадастру України). Очікувані кліматичні умови у найближчому майбутньому (2021-2050 рр.) визначались за результатами проекту Euro-CORDEX для сценарію змін клімату RCP4.5.

Для кожного з вказаних періодів оцінені складові прісного водного балансу лиманів (атмосферні опади, що випадають на водну поверхню лиманів, приплив прісних вод з водозбору, випаровування з водної поверхні лиманів) та визначені нев'язки (дефіцит) річного балансу. Для визначення припливу прісних вод до лиманів з водотоками їх водозбірного басейну, за метеорологічних умов різних кліматичних періодів, використовувалась гідрологічна модель «клімат-стік». Оцінка річного шару випаровування з водної поверхні лиманів виконувалась на підставі даних про багаторічні середні місячні значення температури та відносної вологості повітря у вказані періоди.

Встановлено, що зміни кліматичних умов, які вже відбулись та очікуються у XXI ст., викликають збільшення дефіциту річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Для окремих лиманів такі зміни створюють загрозу їхнього обміління і засолення або, навіть, зникнення. Це потребує розробки нових стратегій водного та екологічного менеджменту квазізакритих лиманів. За вразливістю до змін клімату через виникнення значного річного дефіциту прісного водного балансу, у разі відсутності інших джерел надходження вод (наприклад, з моря), лимани були ранжовані у такій послідовності: Куяльницький, Дофінівський, Будацький (за відсутності надходження вод з Дністровського лиману), Тузлівська група, Сасик, Тилігульський, Хаджибейський (за відсутності надходження до нього зворотних вод).

**Ключові слова:** північно-західне Причорномор'я; квазізакриті лимани; зміни клімату; прісний водний баланс; дефіцит

### 1. ВСТУП

На ділянці узбережжя північно-західної частини Чорного моря в межах річки Дунаю і Дніпра розташовані 17 основних лиманів (рис. 1). Їх можна розділити на дві групи: відкриті, із вільним водообміном з відкритим морем, та умовно названі нами «квазізакритими». До другої групи лиманів віднесені істотно ізольовані від моря

лимани, які епізодично з'єднуються з морем штучно створеними каналами, протоками або іншими водопровідними гідротехнічними спорудами. В цій групі об'єднані «закритий» та «періодично закритий» («напівзакритий», «епізодично з'єднаний з морем») типи лиманів у традиційній їх класифікації [1-3].



**Рис. 1** – Лимани північно-західної частини Чорного моря: 1 – Сасик; 2 – Джантшейський; 3 – Малий Сасик; 4 – Шагани; 5 – Алібей; 6 – Бурнас; 7 – Будацький; 8 – Дністровський; 9 – Сухий; 10 – Хаджибейський; 11 – Куяльницький; 12 – Дофінівський; 13 – Григорівський; 14 – Тилігульський; 15 – Тузли; 16 – Березанський; 17 – Дніпровсько-Бузький

**Fig. 1** – Lagoons in the North-Western Black Sea coast: 1 – the Sasyk; 2 – the Dzhantsheyskiy Liman; 3 – the Malyi Sasyk; 4 – the Shagany; 5 – the Alibei; 6 – the Burnas; 7 – Budatskiy Liman; 8 – Dnistrovskiy Liman; 9 – Suhyi Liman; 10 – Hadzhibeyskiy Liman; 11 – Kuialnytskyi Liman; 12 – Dofinivskiy Liman; 13 – Grygorivskiy Liman; 14 – Tyligulskiy Liman; 15 – the Tuzly; 16 – Berezanskiy Liman; 17 – Dniprovsko-Bugskiy Liman

До групи квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, які розглядаються в цій статті, належать: Сасик (перетворений у водосховище, але у теперішній час запланований до ренатуралізації), Тузлівська група (Шагани, Алібей, Бурнас), Будацький (Шаболатський), Хаджибейський, Куяльницький, Дофінівський (Великий Аджалицький), Тилігульський. Ці лимани в теперішній час не мають усталеного зв'язку з морем і відокремлені від нього піщано-черепашковими перешийками (пересипами) шириною від кількох сотень метрів до 4 км. Раніше в цих пересипах могли періодично утворюватися природні прорви (промоїни). Однак, внаслідок антропогенного перетворення території більшості пересипів, цей процес в теперішній час практично припинився, за винятком поодиноких випадків.

За генезисом квазізакриті лимани поділяються на морські затоки (лагуни), відокремлені від моря пересипами (наприклад, Будацький, Тузлівська група лиманів) та на затоплені морем

гирлові області річок, які у теперішній час втратили природний зв'язок з морем і також відокремлені від нього пересипами різної ширини, в тілі яких споруджені штучні з'єднувальні гідротехнічні споруди, які функціонують епізодично (Хаджибейський, Куяльницький, Дофінівський, Тилігульський лимани) [2, 3].

В останні десятиріччя, починаючи з кінця 80-х років XX ст., на території України спостерігаються істотні зміни клімату та водних ресурсів [4]. На узбережжі північно-західної частини Чорного моря ці зміни характеризуються зростанням посушливості клімату та відповідним зменшенням припливу прісних вод до прибережних лиманів з їхніх водозбірних басейнів [5, 6].

Найбільш чутливими та вразливими до змін клімату є екосистеми квазізакритих лиманів, оскільки через зростання температури повітря і, як наслідок, збільшення випаровування з одночасним зменшенням надходження прісних вод з водозбору, в лиманах цього типу формується

значний дефіцит річного прісного балансу. Якщо цей дефіцит не компенсувати, то виникає багаторічна тенденція до зменшення об'ємів вод у лиманах, їхнього обміління і, як наслідок, до зростання солоності та погіршення якості вод (зростання концентрації біогенних та забруднювальних речовин, погіршення кисневого режиму та ін.) для традиційних видів природокористування [7].

Мета роботи полягає в отриманні кількісних оцінок впливу змін регіонального клімату, що відбулися у недалекому минулому та очікуються у найближчому майбутньому, на прісний водний баланс квазізакритих морських лиманів північно-західного Причорномор'я, які у теперішній час не мають постійного зв'язку з морем і епізодично з'єднуються з ним штучно створеними відкритими каналами або іншими водопровідними гідротехнічними спорудами.

Актуальність отримання таких оцінок полягає в тому, що при визначенні стратегії реалізації природоохоронних заходів, які повинні бути передбачені у планах водного та екологічного менеджменту окремо для кожного з квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, необхідно враховувати ті зміни у формуванні їхнього гідрологічного та гідроекологічного режимів, які вже відбуваються та очікуються у найближчому майбутньому внаслідок зміни регіональних кліматичних умов.

В останні десятиріччя багатьма зарубіжними дослідниками приділяється велика увага визначенню впливу змін клімату на екосистеми прибережних лагун [8-10] через їх чутливість і вразливість до цих змін. Оскільки взаємодія між локальними антропогенними стресовими чинниками та регіональними змінами клімату є дуже складною, підкреслюється необхідність отримання оцінок їхнього сукупного впливу на гідрологічні та екологічні характеристики лагун, а також оцінок ефективності різних стратегій водного та екологічного менеджменту стосовно кожної конкретної лагуни. Проблеми менеджменту лагун в умовах змін клімату розглядаються в роботах [10-13]. В роботі [14] запропоновано індекс природної стійкості лиманів північно-західного Причорномор'я, який розраховується на основі їхніх гідролого-морфометричних характеристик. За цим індексом було виконано ранжування лиманів. Однак він не враховує вплив зміни кліматичних умов на складові водного балансу лиманів і таким чином не визначає їхню вразливість до змін клімату.

Робота ґрунтується на гіпотезі, що зміни регіонального клімату призводять до виникнення та

посилення в останні десятиліття дефіциту річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Величина цього дефіциту для кожного з досліджуваних лиманів, виражена у відсотках від середньорічного об'єму його вод, розглядається як показник вразливості лиману до змін клімату.

## 2. ГІДРОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНИХ ЛИМАНІВ

**Тилігульський лиман** (46° 39,3' – 47° 05,3' пн.ш., 30°57,3' – 31 °12,7' сх.д.) являє собою затоплену морськими водами долину річки Тилігул. Він витягнутий майже меридіонально з північно-північного-заходу на південно-південний-схід. Його довжина становить  $\approx 52$  км, ширина змінюється на окремих ділянках від 0,2 до 5,4 км. Лиман відокремлений від моря природним піщаним пересипом шириною від 3,3 до 4 км і завдовжки до 6,6 км. Південна і центральна частини лиману є улоговинами з переважаючими глибинами в діапазоні 10-16 м, які розділені мілководною перемичкою. Максимальна глибина в південній частині лиману сягає 22,2 м. Північна частина лиману, в яку впадає річка Тилігул, мілководна, з глибинами менше 4 м.

Наприкінці 50-х років ХХ сторіччя в рибгосподарських цілях у пересипі Тилігульського лиману був побудований і введений в експлуатацію штучний канал, який з'єднав лиман з морем. Канал повинен був забезпечити вхід навесні з моря в лиман чорноморської кефалі та інших видів морських риб, а також прісноводних риб, які виносилися в період весняного паводку з Дніпровсько-Бузького лиману до моря. Одночасно будівництво цього каналу було спрямовано на вирішення задачі регулювання водного балансу лиману з метою стабілізації рівня води в ньому.

За минулі роки південна частина каналу, що примикає до моря, дуже обміліла внаслідок перенесення піску з боку моря. У 2012-2015 рр. глибини тут становили лише кілька десятків сантиметрів. У ХХІ ст. канал функціонував нерегулярно, протягом 25-40 діб навесні та восени, після розчищення перших сотень метрів морської частини каналу від піщаних наносів. Тому у 2016 р. була розпочата реконструкція з'єднувального каналу, яка дотепер не закінчилася остаточно.

Площа водозбірного басейну Тилігульського лиману становить 5420 км<sup>2</sup>. У лиман впадають річки: Тилігул (площа водозбору 3550 км<sup>2</sup>, довжина 173 км), Балайчук (площа водозбору

586 км<sup>2</sup>, довжина 52 км), Царега (площа водозбору 657 км<sup>2</sup>, довжина 46 км), Хуторська (площа водозбору 108 км<sup>2</sup>, довжина 19 км). Поверхневий бічний приплив прісних вод по тимчасових водотоках (балках, ярах), які впадають в лиман, формується на площі 349 км<sup>2</sup>. Основна частина стоку в Тилігульський лиман (більше 85 %) надходить від річки Тилігул [5].

**Куяльницький лиман** (46° 33,6' – 46° 48' пн. ш., 30° 34,8' – 30° 46,2' сх. д.) розташований в 2 км на північний захід від північного узбережжя Одеської затоки та є одним з найдавніших закритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Лиман являє собою продовження долини річки Великий Куяльник. Загальна площа водозбору Куяльницького лиману становить 2250 км<sup>2</sup>. Історично, основним джерелом живлення лиману прісною водою була річка Великий Куяльник, площа водозбору якої, при довжині річки в 150 км, становить 1860 км<sup>2</sup> (82,7% загальної водозбірної площі лиману). Окрім неї, вода може надходити до лиману через водотоки його східного берегу (малі річки Довбока, Кубанка, балки Гільдендорфська, Корсунцівська) [6].

Внаслідок господарських перетворень на водозбірному басейні лиману та зміни кліматичних умов, у період 2003-2014 рр. відбулося зменшення його протяжності з 26 до 15,3 км, площі водного дзеркала з 52 до 26,7 км<sup>2</sup>, об'єму вод – з 68 до 11 млн. м<sup>3</sup>; солоність ропи збільшилася зі 108 до 300 ‰ [6]. Для запобігання повному висиханню лиману наприкінці 2014 р. було розпочате поповнення Куяльницького лиману морською водою з Одеської затоки за допомогою спеціально прокладеного самопливного трубопроводу. Поповнення здійснюється в грудні-квітні кожного року, коли температура морської води менша за 8°C.

Середньорічна відмітка рівня води в лимані у 2014 р. становила -6,62 м БС. В період 2015-2021 рр. вона підвищилась до мінус 6,17 м БС у 2018 р., а потім, через вкрай посушливі 2019-2020 рр., знизилась до мінус 6,49 м БС у 2020 р. Відповідно до коливань рівня води в лимані, об'єм його вод змінювався від 29,7 млн. м<sup>3</sup> у 2018 р. до 16,85 млн. м<sup>3</sup> у 2020 р., а площа водної поверхні – від 45,52 км<sup>2</sup> до 34,18 км<sup>2</sup>, відповідно.

Максимальна глибина в лимані, визначена за результатами польових досліджень влітку 2009 р., становила 1,8 м при позначці рівня мінус 6,42 м БС [6].

**Хаджибейський лиман** є непроточною закритою водоймою, яка утворилась в результаті затоплення морем гирлової частини долини річ-

ки Малий Куяльник, з подальшим відділенням її від моря піщаним пересипом. Від моря лиман відділений пересипом шириною 4,5 км і довжиною 5 км. Довжина лиману становить 40 км, ширина – 0,5-3,5 км. Площа водозбірного басейну лиману становить 2,7 тис. км<sup>2</sup>. В лиман впадають річки Малий Куяльник (площа водозбору 1540 км<sup>2</sup>, довжина 118 км) та Свинна (площа водозбору 772 км<sup>2</sup>, довжина 54,1 км) [15].

Систематичні спостереження за стоком річок не виконуються, але відомо, що він дуже зарегульований. Наприкінці 90-х років минулого століття загальна кількість ставків і водосховищ, які регулювали стік р. М. Куяльник, становила 21 шт. з сумарним об'ємом 7,72 млн. м<sup>3</sup>, а в басейні р. Свинна – 9 шт. з сумарним об'ємом 7,02 млн. м<sup>3</sup>. У сучасних умовах стік р. Свинна майже повністю затримується штучними водоймами, розташованими на її гирловій ділянці [15].

Антропогенними чинниками, які значною мірою визначають мінливість рівня води в лимані, є надходження зворотних частково очищених стічних вод м. Одеси зі станції біологічного очищення (СБО) «Північна» (56,4 млн. м<sup>3</sup>/рік), а також дренажних вод з полів зрошення від насосних станцій ДНС № 4, ДНС № 5 та з каналізаційних очисних споруд «НАТІ» (с. Нерубайське Біляївського району) – сумарно 20,2 млн. м<sup>3</sup>/рік [15].

Наприкінці 60-х років ХХ ст. був введений в експлуатацію гідротехнічний вузол для скидання лиманних вод у море у складі головного шлюзу, насосної станції потужністю 7.0 м<sup>3</sup>/с із напірним трубопроводом і водовипуском до моря. Однак в останні роки він не функціонує і актуальним є питання відновлення можливості аварійного самопливного скиду води з лиману до моря (у разі підвищення відмітки рівня води в лимані до критичних значень) через реконструйовані канали.

**Дофінівський лиман** утворився в результаті трансгресії моря в долину річки Великий Аджалик. В теперішній час річка, довжина якої раніше досягала 25-30 км, практично припинила своє існування. Площа водозбору басейну Дофінівського лиману з урахуванням басейну річки Великий Аджалик і Чорної балки приблизно дорівнює 110 км<sup>2</sup>, з них площа водозбору власне лиману – 50 км<sup>2</sup>. Прісна вода може надходити до лиману з системи ставків, розташованих на території с. Олександрівка, в обсягах 200-300 м<sup>3</sup>/доб, а також переливатися через дамбу, яка відділяє лиман від Олександрівського ставка, коли він переповнюється [16]. В роботі [17]

річний об'єм поверхневого стоку 50% забезпеченості в лиман оцінюється в 1,8 млн.м<sup>3</sup>, а в [16] – в 3,03 млн.м<sup>3</sup>; в маловодний рік 95% забезпеченості – 1,36 млн.м<sup>3</sup>.

З 1998 р. епізодичний зв'язок лиману з морем підтримується штучно через трубопровід довжиною 250 м з діаметром труби 920 мм, яка виходить в море на глибину 3 м. Довжина морської частини трубопроводу становить 200 м.

**Будацький (Шаболатський) лиман**, відмежований від моря вузьким пересипом шириною 80-200 метрів, має загальну довжину 17 км, середню ширину – 1,5 км, максимальну ширину – 2,5 км. Середня глибина лиману становить 1,05 м, максимальна – досягає 2,25 м. З врахуванням плавнів у східній частині лиману, загальна площа його водної поверхні становить 31,5 км<sup>2</sup>, а об'єм вод – 30,0 млн.м<sup>3</sup> [2, 18]. Водозбірна площа лиману становить 156 км<sup>2</sup>.

У теперішній час Будацький і Дністровський лимани з'єднані двома каналами, які залишаються відкритими протягом усього року. Навесні і восени лиман з'єднується з Чорним морем каналом, розташованим в південно-західній частині пересипу поблизу села Приморське (Будаки). Невеличкі обсяги прісного стоку можуть надходити до лиману через балки (Аккембетську і поблизу с.Приморське). Морська вода надходить в лиман навесні і восени через морський канал, а в період сильних нагінних вітрів – з Дністровського лиману через Бугазькі канали [19].

**Тузлівська група** лиманів утворилися в результаті затоплення морем низьких ділянок суші з подальшим відокремленням від моря піщаним пересипом – баром. У складі Тузлівської групи лиманів виділяють 3 основних («первинних») лимани: Шагани, Бурнас, Алібей, – та ряд «вторинних» лиманів [20]. Лимани Шагани, Бурнас і Алібей сполучені між собою широкими протоками і відокремлені від моря однією загальною косою-пересипом, тому розглядаються як єдиний лиманний комплекс. Довжина пересипу, що відокремлює лимани від моря, приблизно 29 км, ширина – від 60 до 400 м.

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. З 1953 по 1990 рр. в косі постійно діяли від 2 до 5 таких каналів, що забезпечувало стабільний та сприятливий для рибогосподарської діяльності гідролого-гідрохімічний режим.

В період 2010-2015 рр. водойма з'єднувалась з морем широкою та глибокою прорвою-промоїною, яка утворилась в результаті розмиву спочатку невеликого, штучно створеного каналу на 24 км коси-пересипу (л.Шагани). У 2015 р. прорва на 24-му км 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 проектною шириною 15,0 м і відміткою дна мінус 1,0 м БС, який функціонував декілька місяців навесні і восени.

Площа водозбору Тузлівської групи лиманів становить 2231 км<sup>2</sup>. Основними водотоками, які періодично живлять лимани прісною водою є: річка Хаджидер (оз.Хаджидер-л.Алібей) – з площею водозбору 894 км<sup>2</sup>; річка Алкалія (оз.Солоне-л.Бурнас) – 443 км<sup>2</sup>.

Історично **водосховище Сасик** сформувалося як водоймище естуарно-лиманного типу з природним водообміном з прилеглою частиною Чорного моря (Жебріянською бухтою) через прорви, які періодично утворювались в піщаному пересипі, що відокремлює водойму від моря.

В 1978 р., в рамках побудови першої черги Дунай-Дніпровської зрошувальної системи, лиман Сасик був відокремлений від моря, шляхом розширення 15-кілометрового пересипу та укріплення його бетонними елементами, а сам лиман був поєднаний з річкою Дунай шлюзованим каналом.

Проте основні цілі проекту – покращення питного та промислового водопостачання, доведення до нормативних вимог якості вод, що використовуються для зрошення, – не були досягнуті. Головною причиною була незадовільна якість вод водосховища Сасик. В цілому стан екосистеми водосховища у теперішній час можна охарактеризувати як напружений і нестабільний, тобто як стан екосистеми штучної водойми, яка має обмежені можливості для саморегулювання і залежить головним чином від зовнішнього фактору.

В північну частину лиману може надходити стік 2-х річок – Когильник та Сарата. Сарата має довжину 120 км, площу водозбору 1250 км<sup>2</sup>. Річище її частково розчищене і спрямлене. Шляхом регулювання річкового стоку шлюзами, вода використовується для промислового й сільськогосподарського водопостачання та зрошення. Когильник має довжину 243 км, площу водозбірної басейну – 3910 км<sup>2</sup> [21, 22].

### 3. МЕТОДИ І МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Природний прісний водний баланс лиманів визначається співвідношенням основних прибуткових та витратних його складових. До перших належать: атмосферні опади на водне дзеркало водойми та надходження вод з водозбірного басейну лиману зі стоком річок та інших водотоків. До других – випаровування з водної поверхні лиману. Підземне живлення лиманів не враховувалось, оскільки в умовах посушливого клімату північно-західного Причорномор'я воно, навіть до початку кліматичних змін, за оцінками [23] становило менше 10% від інших вищевказаних і добре вивчених прибуткових складових водного балансу лиманів, тобто знаходилося в межах точності розрахунків водного балансу. Отже рівняння річного прісного балансу суто закритого лиману може бути записано в такий спосіб

$$\delta W = W_P + W_R - W_E, \quad (1)$$

де  $\delta W$  – нев'язка (дефіцит або профіцит) річного прісного водного балансу, млн.м<sup>3</sup>;  $W_P$  – об'єм атмосферних опадів, що випали на водну поверхню лиману, млн.м<sup>3</sup>, за рік;  $W_R$  – об'єм припливу води по водотоках з водозбірного басейну до лиману, млн.м<sup>3</sup>, за рік;  $W_E$  – об'єм води, що випарився з водної поверхні лиману за рік, млн.м<sup>3</sup>.

У разі додатного значення  $\delta W$  рівень води в лимані буде підвищуватись, а від'ємного – знижуватись.

Регулювання рівня води в лиманах на багаторічному часовому масштабі можливе шляхом встановлення природного (через природні прорви-промоїни у пересипу) або штучного (через штучно створені з'єднувальні канали, трубопроводи) їхнього водообміну з морем. З урахуванням цього, рівняння водного балансу лиману з'єданого з морем набуває такого вигляду:

$$W_P + W_R - W_E + \delta W_{SEA} = 0, \quad (2)$$

де  $\delta W_{SEA} = W_{S-L}^+ - W_{S-L}^-$  – різниця між об'ємами води, яка вийшла з лиману до моря  $W_{S-L}^+$  та надійшла з моря до лиману  $W_{S-L}^-$  через прорву або канал(и), трубопроводи протягом року.

Складові прісного водного балансу  $W_P$  і  $W_E$  у рівнянні (1) істотним чином, а  $W_R$  – опоряд-

ковано, від таких метеорологічних характеристик клімату північно-західного Причорномор'я, як опади, температура та відносна вологість повітря.

Для розрахунку складових водного балансу лиманів у сучасний період використовувались дані середніх місячних значень температури, відносної вологості повітря і місячних сум атмосферних опадів за 19-річний період (з 2000 по 2018 роки) отримані на 4 метеорологічних станціях (Сарата, Одеса, Сербка, Очаків) розташованих у зазначеному регіоні. Додатково залучались дані щодо середніх місячних значень температури повітря і місячних сум атмосферних опадів на прибережних гідрометеорологічних станціях «порт Південний» та «Білгород-Дністровський».

Порівняльний аналіз здійснювався з аналогічними даними Кліматичного кадастру України, розрахованими за 1961–1990 роки (далі – Кадастр) [24]. Цей період надалі будемо звати базовим. Зауважимо, що оскільки за свідченням [4, 25] початок суттєвих змін клімату і водних ресурсів в Україні припадає саме на кінець 1980-х років, то метеорологічні і гідрологічні характеристики в період 1961–1990 рр. дійсно є посиляльними для визначення як зміни кліматичних умов, так і їх наслідків.

Очікувані кліматичні умови у найближчому майбутньому (2021-2050 рр.) визначались за результатами проекту Euro-CORDEX [26] для сценарію змін клімату RCP4.5 [27]. З ансамблю 14 симуляцій за різними регіональними кліматичними моделями була обрана одна – отримана за регіональною моделлю CLMcom-CCLM4-8-17 у поєднанні з глобальною моделлю MPI-ESM-LR, позначена в цілому як CLMcom4, яка якнайкраще відповідає середнім за ансамблем симуляцій значенням [26]. За даними цієї модельної симуляції були отримані оцінки очікуваних у найближчому майбутньому багаторічних середньомісячних значень приземної температури повітря, питомої вологості повітря та місячних сум атмосферних опадів. В обраних розрахункових вузлах модельної сітки, розташованих на узбережжі північно-західного Причорномор'я поблизу досліджуваних лиманів, для вказаних метеорологічних параметрів визначалась типова для періоду 2021-2050 років внутрішньорічна мінливість їхніх середніх місячних значень.

Оцінка річного шару випаровування з водної поверхні лиманів в першому наближенні здійснювалась із використанням розрахункової формули [28] за даними про багаторічні середні місячні значення температури та відносної вологості повітря:

$$E = 0,0018(25 + T_a)^2(100 - R), \quad (3)$$

де  $E$  – шар випаровування (мм/міс);  $T_a$  – багаторічна середньомісячна температура повітря (°C);  $R$  – багаторічне значення середньомісячної відносної вологості повітря (%).

Оскільки дані спостережень за стоком річок і водотоків, які живлять досліджувані квазізакриті лимани, взагалі відсутні або недостатні для достовірної кількісної оцінки його змін внаслідок спільного впливу природних та антропогенних чинників, то для визначення припливу прісних вод до лиманів за метеорологічних умов різних кліматичних періодів використовувалась модель «клімат-стік» [29]. Модель дозволяє отримувати оцінки характеристик природного та побутового (перетвореного водогосподарською діяльністю) річкового стоку, на базі метеорологічної інформації та відомостей про показники господарського використання стоку, і містить у собі ланцюг розрахункових блоків “клімат – кліматичний (зональний) стік – підстильна поверхня – природний стік – водогосподарська діяльність – побутовий стік”. Розрахунок річних об’ємів стоку річок в період до початку кліматичних змін (1961-1990 рр.) та у сучасний кліматичний період (2000-2018 рр.) виконувався за даними спостережень на 6 метеорологічних станціях межиріччя Дністер – Південний Буг (Любашівка, Одеса, Роздільна, Сербка, Затишшя, Вознесенськ) та 8 станціях межиріччя Дунай – Дністер (Ізмаїл, Сарата, Білгород-Дністровський, Дубосари, Комрат, Леово, Болград, Чадир-Лунга) [30], а для майбутнього періоду 2021-2050 рр. – за метеорологічними даними середньостатистичної модельної траєкторії змін клімату за сцена-

рієм RCP4.5, отриманими осередненням результатів моделювання за ансамблем з 14 симуляцій різними регіональними кліматичними моделями проекту Euro-CORDEX.

Морфометричні характеристики досліджуваних квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор’я, що використовувались для оцінки змін складових їхнього річного прісного водного балансу та величин його нев’язки, наведені в табл. 1. Площі водного дзеркала лиманів були актуалізовані до умов 2020 р. за даними супутникових знімків із використанням інструментів Google Earth, а об’єми води оцінені через доступні відомості про середню глибину водойм. Внутрішньорічні зміни об’єму води в лиманах та площі їх водної поверхні не враховувались.

Як показники вразливості лиманів північно-західного Причорномор’я до змін клімату використовувались виражені у відсотках співвідношення:

➤ між дефіцитом річного прісного водного балансу і загальним середнім багаторічним об’ємом вод в кожному з лиманів:

$$I_{PRE} = \frac{(W_P + W_R - W_E) \times 100\%}{W}; \quad (4)$$

➤ різницею річних об’ємів атмосферних опадів та випаровування з водної поверхні лиманів (при незмінній середній багаторічній її площі) і загальним середнім багаторічним об’ємом води в кожному з лиманів:

$$I_{PE} = \frac{(W_P - W_E) \times 100\%}{W}. \quad (5)$$

**Таблиця 1** – Морфометричні характеристики досліджуваних квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор’я прийняті для розрахунків складових їхнього прісного водного балансу

**Table 1** – Morphometric characteristics of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast used to calculate the components of their fresh-water balance

№ п/п	Лиман	$W$ – об’єм вод, млн. м <sup>3</sup>	$S$ – площа водного дзеркала, км <sup>2</sup>	$H_{сер}$ – середня глибина, м	Відмітка рівня води у водоймі, м БС	Посилальне джерело
1	Тилігульський	693,0	128,85	5,4	-0,4	[5]
2	Дофінівський	4,5	6,1	0,74	-0,1	[2, 17]
3	Хаджибейський	729,0	114,0	6,4	1,5	[15]
4	Куяльницький	28,3	45,0	0,63	-6,2	Дослідження ОДЕКУ, 2016 р.
5	Будацький	31,5	30,0	1,05	-0,4	[2]
6	Тузлівська група	236,0	196,7	1,2	-0,3	[1, 20]
7	Сасик	414,3	197,3	2,1	0	Дослідження УкрНЦЕМ, 2008 р.

Чим вище значення вищевказаних показників-індексів, тим більша чутливість конкретного лиману до змін клімату.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У таблиці 2 наведені дані щодо річної норми атмосферних опадів у сучасний період 2000–2018 рр. та у найближчому майбутньому (2021–2050 рр., за сценарієм RCP4.5), порівняно з даними базового періоду (1961–1990 рр.). Відзначимо деяке збільшення річної кількості опадів у сучасний період, порівняно з базовим періодом, на станціях розташованих уздовж західного узбережжя північно-західної частини Чорного моря (Одеса, Білгород-Дністровський, Сарата), з наступним очікуваним їх зменшенням за сценарієм RCP4.5 в 2021–2050 рр. На станціях Сербка та порт-Південний північного узбережжя в 2021–2050 рр., навпаки, очікується незначне збільшення річної кількості опадів порівняно з сучасним періодом.

У табл. 3-4 наведені середні річні значення температури і відносної вологості повітря обчислені за багаторічними середньомісячними значеннями за ті ж періоди. З табл. 3 видно, що протягом XXI ст. відзначається поступове підвищення температури повітря проти базового періоду 1961–1990 рр. Середня річна температура повітря у період 2000–2018 рр. на 1,1–1,5 °C (10–14 %) вища, ніж у період 1961–1990 рр., а очікувана у період 2021–2050 рр. – вища на 2,5–3,6 °C (24–36 %).

Середні річні значення відносної вологості повітря у період 2000–2018 рр. майже не відрізняються від характерних для базового періоду 1961–1990 рр., на відміну від визначених як очікувані в період 2021–2050 рр. за сценарієм RCP4.5 згідно з симуляцією CLMcom4 (табл. 4). Останні зменшуються на 10–16 % порівняно з характерними для сучасного періоду значеннями.

Річні шари випаровування з водної поверхні в районах розташування обраних для аналізу метеорологічних станцій в північно-західному Причорномор'ї, обчислені із використанням формули (4) за різні досліджувані періоди, наве-

дені в табл. 5. Видно, що з початку XXI ст. (2000–2018 рр.) випаровування з поверхні водойм збільшилось на 13–15 % уздовж північного узбережжя північно-західної частини Чорного моря і на 7–9 % – уздовж західного узбережжя, порівняно з базовим періодом 1961–1990 рр.

Як зазначалося вище, за обраною симуляцією CLMcom4 очікується зменшення в період 2021–2050 рр. річних значень відносної вологості повітря на 10–16 %, порівняно з характерними для сучасного періоду значеннями. Однак тенденція таких суттєвих змін не виявляється при порівнянні даних спостережень за вологістю повітря у періоди 2000–2018 та 1961–1990 рр. (табл. 4). Тому в табл. 5 для періоду 2021–2050 рр. визначались значення річного випаровування як з урахуванням очікуваних суттєвих змін вологості повітря згідно зі сценарієм RCP4.5, так і припускаючи, що суттєвих змін вологості повітря у порівнянні з періодом 2000–2018 рр. не відбудеться.

Оцінки наведені в табл. 5 свідчать, що тільки за рахунок підвищення температури повітря річний шар випаровування з водної поверхні лиманів у період 2021–2050 рр. збільшиться на 11–20 % порівняно з базовим періодом 1961–1990 рр. У разі врахування очікуваних змін не тільки температури повітря, але й його відносної вологості, шар випаровування збільшиться на 30–56 %.

Оцінки річних об'ємів припливу прісних вод зі стоком річок і малих водотоків до досліджуваних квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я з їхніх водозбірних басейнів у порушених водогосподарською діяльністю умовах, отримані із використанням моделі «клімат-стік», наведені в табл. 6. Встановлено, що, в середньому, об'єм припливу прісних вод до лиманів, за умови збереження сучасного рівня водогосподарської діяльності, в період 2021–2050 рр., порівняно з базовим періодом до 90-х років XX ст., зменшиться на 45% за кліматичних умов траєкторії сценарію RCP4.5.



**Таблиця 2** – Річна кількість атмосферних опадів (мм) у періоди 1961-1990, 2000–2018 та 2021-2050 рр. (за сценарієм RCP4.5)

**Table 2** – Annual precipitation (in mm) for 1961-1990, 2000-2018, and 2021-2050 (by RCP4.5 scenario)

№ п/п	Назва пункту спостережень	1961-1990 роки (дані Кадастру)	2000-2018 роки	2021-2050 роки
1	Очаків	417	425	-
2	Південний	-	441	466
3	Сербка	460	449	461
4	Одеса	464	485	450
5	Білгород-Дністровський	433	459	420
6	Сарата	482	488	428

**Таблиця 3** – Середня річна температура повітря (°C) у періоди 1961-1990, 2000–2018 та 2021-2050 рр. (за сценарієм RCP4.5)

**Table 3** – Annual temperature (in °C) for 1961-1990, 2000-2018, and 2021-2050 (by RCP4.5 scenario)

№ п/п	Назва пункту спостережень	1961-1990 роки (дані Кадастру)	2000-2018 роки	2021-2050 роки
1	Очаків	10,0	11,1	-
2	Південний	-	11,3	12,5
3	Сербка	9,4	10,7	12,0
4	Одеса	10,1	11,5	12,6
5	Білгород-Дністровський	10,6	12,1	13,6
6	Сарата	10,1	11,2	13,7

**Таблиця 4** – Середнє річне значення відносної вологості повітря (%) у періоди 1961-1990, 2000–2018 та 2021-2050 рр. (за сценарієм RCP4.5)

**Table 4** – Annual relative humidity (in %) for 1961-1990, 2000-2018, and 2021-2050 (by RCP4.5 scenario)

№ п/п	Назва пункту спостережень	1961-1990 роки (дані Кадастру)	2000-2018 роки	2021-2050 роки
1	Очаків	79	75	-
2	Південний	-	-	64
3	Сербка	73	72	65
4	Одеса	76	75	63
5	Білгород-Дністровський	77	-	66
6	Сарата	76	76	66

**Таблиця 5** – Річна норма випаровування (мм), обчислена за періоди 1961-1990, 2000–2018 та 2021-2050 рр. (за сценарієм RCP4.5)

**Table 5** – Annual evaporation (in mm) for 1961-1990, 2000-2018, and 2021-2050 (by RCP4.5 scenario)

№ п/п	Назва пункту спостережень	1961-1990 роки (дані Кадастру)	2000-2018 роки	2021-2050 роки *(**)
1	Очаків	761	856	-
2	Південний	-	857	1117 (894)
3	Сербка	855	968	1120 (1007)
4	Одеса	752	862	1175 (900)
5	Білгород-Дністровський	748	815	970 (832)
6	Сарата	768	824	1033 (890)

\* – з урахуванням очікуваних суттєвих змін вологості повітря;

\*\* – за припущення, що суттєвих змін вологості повітря у порівнянні з періодом 2000-2018 рр. не відбудеться.

**Таблиця 6** – Результати оцінки змін припливу прісних вод від водотоків (млн.м<sup>3</sup>/рік) до досліджуваних лиманів північно-західного Причорномор'я за різних кліматичних умов, з урахуванням водогосподарської діяльності  
**Table 6** – Estimates of fresh-water inflow components (in million m<sup>3</sup>/year) into the quasi-closed lagoons by watercourses under different climatic conditions taking into account water management activity

Лиман	Назва річки	Базові (до 1990-х рр.)	Сучасний у XXI ст.	За сценарієм RCP4.5 (2021-2050 рр.)
Тилігульський	Тилігул (+інші)	33,1 (38,8)	22,5 (25,3)	19,5 (21,5)
Дофінівський	Великий Аджалик	3,03	1,8	1,88
Куяльницький	Великий Куяльник (+ інші)	12,8 (13,2)	6,78 (7,5)	6,8 (6,83)
Хаджибейський	Малий Куяльник (+Свинна)	12,6 (14,9)	6,29 (6,45)	5,78 (6,5)
Тузлівські лимани	Хаджидер (+Алкалія)	6,15 (9,65)	4,19 (7,02)	2,93 (4,9)
Сасик	Когильник (+Сарата)	44,2 (49,1)	32,7 (37,4)	30,3 (32,65)

Результати, наведені в табл. 7, свідчать, що до початку прояву кліматичних змін (тобто, до початку 90-х років ХХ ст.) дефіцит річного прісного водного балансу для більшості квазізакритих лиманів не перевищував декількох відсотків від об'єму води в них, окрім Тузлівської групи та Будацького лиманів (рис. 2). Але для останнього це не створювало значних проблем, оскільки не враховувалась можливість надходження до Будацького лиману розпріснених вод з Дністровського лиману, через штучно створені ерики в планях.

Однак оцінки складових річного водного балансу для перших десятиріч ХХІ ст., наведені в табл. 8, свідчать про виникнення або поглиблення дефіциту річного прісного водного балансу для всіх квазізакритих лиманів. Особливо відчутними ці зміни були для Куяльницького лиману, де сформувався річний дефіцит прісного балансу в 33 % від загального об'єму вод лиману, та До-

фінівського лиману – до 13 %. Для Тузлівської групи лиманів дефіцит збільшився з 20 % в базовий період до 25 % – в період 2000-2018 рр., для Тилігульського лиману – з 0,7 до 5,0 %, а для водосховища Сасик – з 1,2 до 6,3 % (рис. 2).

Очікувані у період 2021-2050 рр. за сценарієм RCP4.5 оцінки складових прісного водного балансу досліджуваних лиманів північно-західного Причорномор'я та величини їх нев'язки наведені у табл. 9. Видно, що врахування очікуваних змін відносної вологості повітря за результатами симуляції CLMcom4 призводить до значного збільшення нев'язки річного прісного водного балансу лиманів. Для Куяльницького лиману річний дефіцит балансу прісних вод досягає 91 % від загального об'єму його вод. У Дофінівському, Будацькому та Тузлівській групі лиманів нев'язка близька до 50 %, а у водосховищі Сасик – становить 20 % від об'ємів їхніх вод (рис. 2).

**Таблиця 7** – Оцінки складових річного прісного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я у базовий період (1961-1990 рр.)

**Table 7** – Estimates of annual fresh-water balance (in million m<sup>3</sup>/year) for the quasi-closed lagoons in reference period (1961-1990)

№ п/п	Лиман	$W_P$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$W_R$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$W_E$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$\delta W$ , млн. м <sup>3</sup> /рік
1	Тилігульський	60,29	38,8	-104,11	-5,02
2	Дофінівський	2,82	3,03	-4,68	1,17
3	Хаджибейський	52,90	14,9	-85,72	-17,92
4	Куяльницький	20,88	13,2	-33,84	0,24
5	Будацький	12,99	0,0	-22,44	-9,45
6	Тузлівська група	94,81	9,65	-151,06	-46,60
7	Сасик	91,03	49,1	-145,14	-5,01

**Таблиця 8** – Оцінки складових річного прісного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я у сучасний період (2000-2018 рр.)**Table 8** – Estimates of annual fresh-water balance (in million m<sup>3</sup>/year) for the quasi-closed lagoons in the current period (2000-2018)

№ п/п	Лиман	$W_P$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$W_R$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$W_E$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$\delta W$ , млн. м <sup>3</sup> /рік
1	Тилігульський	57,33	25,3	-117,51	-34,88
2	Дофінівський	2,85	1,8	-5,24	-0,59
3	Хаджибейський	55,29	6,45	-98,27	-36,53
4	Куяльницький	21,83	7,50	-38,79	-9,46
5	Будацький	13,77	0,0	-24,45	-10,68
6	Тузлівська група	95,98	7,02	-162,08	-59,08
7	Сасик	92,22	37,4	-155,72	-26,1

**Таблиця 9** – Оцінки складових річного прісного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я у період 2021-2050 рр. за сценарієм RCP4.5**Table 9** – Estimates of annual fresh-water balance (in million m<sup>3</sup>/year) for the quasi-closed lagoons in the near future (2021-2050) by RCP4.5 scenario

№ п/п	Лиман	$W_P$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$W_R$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$W_E^*$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$W_E^{**}$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$\delta W^*$ , млн. м <sup>3</sup> /рік	$\delta W^{**}$ , млн. м <sup>3</sup> /рік
1	Тилігульський	59,79	21,5	-144,05	-128,82	-62,76	-47,53
2	Дофінівський	2,78	1,88	-6,99	-5,48	-2,33	-0,82
3	Хаджибейський	51,30	6,5	-133,95	-102,60	-76,15	-44,80
4	Куяльницький	20,25	6,83	-52,88	-40,50	-25,80	-13,42
5	Будацький	12,6	0	-29,1	-24,96	-16,5	-12,36
6	Тузлівська група	84,18	4,9	-203,19	-175,06	-114,11	-85,98
7	Сасик	80,88	32,65	-195,22	-168,19	-81,69	-54,66

\* – з урахуванням очікуваних суттєвих змін вологості повітря

\*\* – за припущення, що суттєвих змін вологості повітря у порівнянні з періодом 2000-2018 рр. не відбудеться

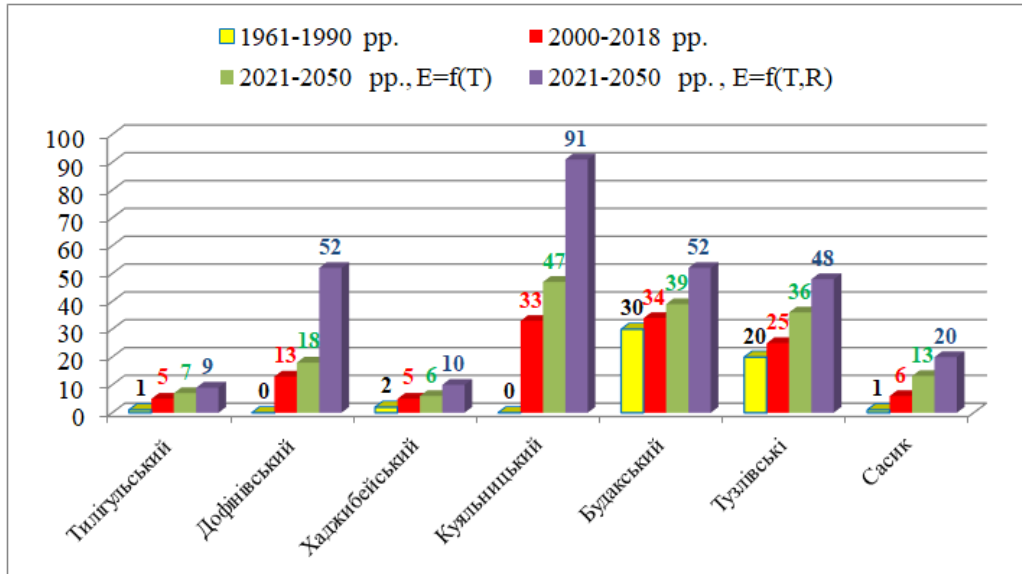
В той же час, збільшення нев'язок річного прісного балансу лиманів, розрахованих у припущенні, що суттєвих змін вологості повітря у період 2021-2050 рр. порівняно з 2000-2018 рр. не відбудеться, є меншим. Вони будуть становити близько 47 % від загального об'єму вод для Куяльницького лиману, 39 % – для Будацького лиману, 36 % – для лиманів Тузлівської групи, 18 % – для Дофінівського лиману і 13 % – для водойми Сасик (рис. 2).

На рис. 3 наведені значення показника  $I_{PE}$ , розраховані за формулою (5) для кожного з досліджуваних лиманів. Вони показують, який внесок у формування дефіциту прісного водного балансу лиманів вносить різниця річних об'ємів атмосферних опадів і випаровування з їх водної поверхні.

Отже отримані результати свідчать про те, що зміни кліматичних умов, які вже відбулись і очікуються у ХХІ ст., викликають суттєве збільшення дефіциту річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Для окремих лиманів зазначені зміни можуть створювати загрозу їхнього зник-

нення. З рис. 2-3 видно, що за вразливістю до змін клімату через виникнення значного річного дефіциту прісного водного балансу, у разі відсутності інших джерел надходження вод (наприклад, з моря), досліджувані лимани можуть бути ранжовані у такій послідовності: Куяльницький, Дофінівський, Будацький (за відсутності надходження вод з Дністровського лиману), Тузлівська група, Сасик, Тилігульський, Хаджибейський (за відсутності антропогенного стоку).

Слід зауважити, що оцінки інтенсивності випаровування, отримані із використанням залежності (3), не враховують вплив на неї поточної солоності вод в досліджуваних лиманах. Такий підхід продиктований тим, що солоність вод лиманів залежить не тільки від кліматичних умов, а, значною мірою, визначається антропогенним регулюванням водообміну лиманів з морем. Високі значення солоності вод знижують інтенсивність випаровування. Наприклад, для Куяльницького лиману, з урахуванням мінливості солоності його вод 150-300 ‰, об'єм випаровування може бути на 25-50 % меншим.

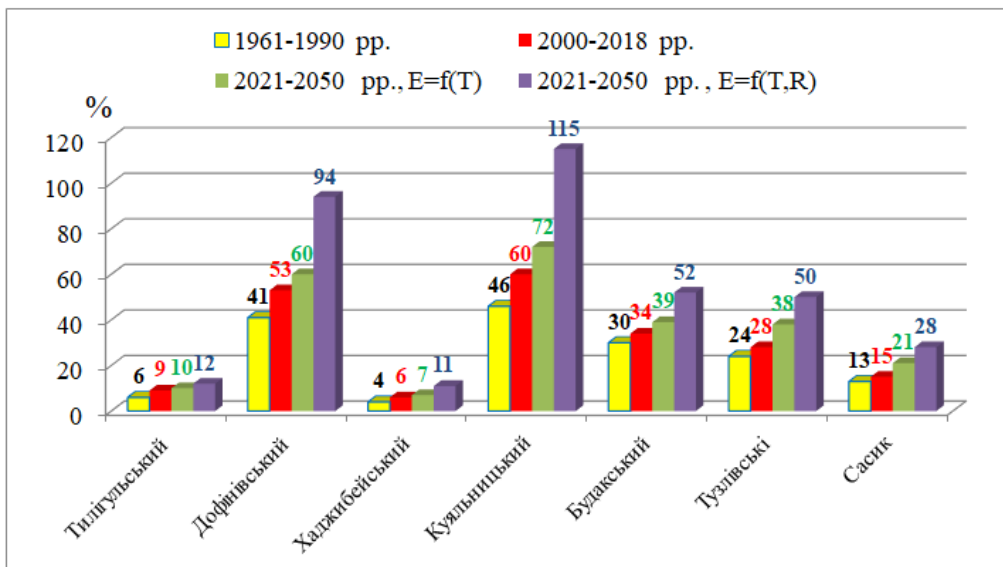


Позначення:  $E = f(T)$  – випаровування розраховувалось у припущенні незмінності відносної вологості повітря порівняно з сучасним періодом;  $E = f(T, R)$  – при розрахунках випаровування враховувались очікувані зміни не тільки температури повітря, а й його відносної вологості, за сценарієм RCP4.5

Note:  $E = f(T)$  is the evaporation calculated under the assumption of constant air relative humidity as compared with the current period.  $E = f(T, R)$  is the evaporation calculated with both temperature-induced and relative humidity-induced changes of evaporation are taken into account. The values are for the RCP4.5 climate change scenario

**Рис. 2** – Відсоток річного дефіциту прісного водного балансу від середньорічного об'єму води (показник  $I_{PRE}$ ) в квазізакритих лиманах північно-західного Причорномор'я

**Fig. 2** – Percentage of annual deficit for fresh-water balance of the annual water volume ( $I_{PRE}$  index) for quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast



Позначення:  $E = f(T)$  – випаровування розраховувалось у припущенні незмінності відносної вологості повітря порівняно з сучасним періодом;  $E = f(T, R)$  – при розрахунках випаровування враховувались очікувані зміни не тільки температури повітря, а й його відносної вологості, за сценарієм RCP4.5

Note:  $E = f(T)$  is the evaporation calculated under the assumption of constant air relative humidity as compared with the current period.  $E = f(T, R)$  is the evaporation calculated with both temperature-induced and relative humidity-induced changes of evaporation are taken into account. The values are for the RCP4.5 climate change scenario

**Рис. 3** – Відсоток річного дефіциту прісного водного балансу, який формується за рахунок різниці атмосферні опади-випаровування, від середньорічного об'єму води в лиманах (показник  $I_{PE}$ )

**Fig. 3** – Percentage of annual deficit for fresh-water balance (resulted from precipitation-evaporation difference) of the annual water volume in the quasi-closed lagoons ( $I_{PE}$  index)

## 5. ВИСНОВКИ

На підставі аналізу змін середньобагаторічних значень метеорологічних характеристик, які визначають складові прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, встановлено, що з початку XXI ст. відбувається:

- поступове підвищення температури повітря – середня річна температура повітря у період 2000-2018 рр. на 11-14 % вища, ніж у період 1961-1990 рр., а очікувана у період 2021-2050 рр. – вища на 24-36 %;
- зменшення відносної вологості повітря у період 2021-2050 рр. на 10-16 %;
- збільшення річного шару випаровування з водної поверхні водойм на 13-15 % у період 2000-2018 рр. уздовж північного узбережжя північно-західної частини Чорного моря і на 7-9 % – уздовж західного узбережжя;
- у період 2021-2050 рр. збільшення річного шару випаровування з водної поверхні лиманів тільки за рахунок підвищення температури повітря – на 11-20 %, а у разі врахування очікуваного зменшення відносної вологості – на 30-56 %;
- збільшення на 2-6 % річної кількості атмосферних опадів у період 2000-2018 рр. та наступне зменшення їх на 3-11 % в 2021-2050 рр. за сценарієм RCP4.5 уздовж західного узбережжя північно-західної частини Чорного моря, порівняно з періодом 1961-1990 рр.

Оцінки очікуваного припливу прісних вод від річок і малих водотоків до квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, отримані із використанням моделі «клімат–стік» за умови збереження сучасного рівня водогосподарської діяльності, свідчать, що у період 2021-2050 рр. об'єми припливу зменшаться порівняно з базовим періодом (до 90-х років XX ст.) на 45% у кліматичних умовах траєкторії сценарію RCP4.5.

Встановлено, що зміни кліматичних умов, які вже відбулись і очікуються в XXI ст. спричиняють збільшення дефіциту річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, які для окремих лиманів, як, наприклад, Куяльницького, Дофінівського, Будацького (за відсутності антропогенного регулювання зовнішнього водообміну), Тузлівської групи лиманів, можуть створювати загрозу їх зникнення. За вразливістю до змін клімату через виникнення значного річного дефіциту прісного водного балансу, у разі відсутності інших джерел надходження вод (наприклад, з

моря), лимани ранжовані у такій послідовності: Куяльницький, Дофінівський, Будацький (за відсутності надходження вод з Дністровського лиману), Тузлівська група, Сасик, Тилігульський, Хаджибейський (за відсутності надходження стоку з антропогенних джерел).

Для найбільш вразливих до змін клімату лиманів в першу чергу повинні розроблятися науково-обґрунтовані плани управління річковими басейнами, інтегрованого управління прибережними територіями, до складу яких входять лимани, плани дій для досягнення «доброго» екологічного стану їх акваторій, що передбачено Морською природоохоронною стратегією України. Для більшості квазізакритих лиманів ефективно вирішення проблеми стабілізації їх гідроекологічного режиму в умовах збільшення дефіциту прісного водного балансу, зумовленого зміною клімату, полягає в забезпеченні постійного протягом року різноспрямованого водообміну з морем через штучні з'єднувальні канали з морфометричними характеристиками, за яких не буде відбуватись засолення лиманів у багаторічній перспективі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенгурт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов одесских лиманов: монография. Киев: Наукова думка, 1974. 217 с.
2. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология: монография / под ред. Ю. П. Зайцева, Б. Г. Александрова, Г. Г. Миничевой. Киев: Наукова думка, 2006. С. 351-355.
3. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья: монография / Одесский государственный экологический университет; под ред. Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко. Одесса: ТЕС, 2012. 224 с.
4. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз): монографія. Київ: Ніка-центр, 2010. 316 с.
5. Водні ресурси та гідроекологічний стан Тилігульського лиману: монографія / за ред. Ю. С. Тучковенко, Н. С. Лободи. Одеса: ТЕС, 2014. 276 с.
6. Водний режим та гідроекологічні характеристики Куяльницького лиману / за ред. Н.С. Лободи, Є.Д. Гопченка. Одеса: ТЕС, 2016. 332 с.
7. Тучковенко Ю. С., Тучковенко О. А. Модель евтрофікації морських і лиманних екосистем северо-западного Причерноморья. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. 21. С. 75-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08>
8. Lloret J., Marín A., Marín-Guirao L. Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? *Estuar Coast Shelf Sci*. 2008. 78(2). Pp. 403–412.
9. Anthony A., Atwood J., August P. et al. Coastal lagoons and climate change: ecological and social ramifications in U.S. Atlantic and Gulf coast ecosystems. *Ecology and Society*. 2009. 14(1). Pp.8.

10. Sustainable management in Mediterranean coastal lagoons: interactions among capture fisheries, aquaculture and the environment / Cataudella S., Crosetti D., Ciccotti E., Massa F. *Studies and reviews No. 95, General Fisheries Commission for the Mediterranean*. Rome. 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Pp. 29-35.
11. Is the governance of the Thau coastal lagoon ready to face climate change impacts? / La Jeunesse, C. Cirelli, H. Sellami et al. *Ocean & Coastal Management*. 2015. Vol.118, Part B. Pp. 234–246.
12. Coastal lagoons: ecosystem processes and modeling for sustainable use and development / Edited by Gönenç I. E., Wolflin J. P. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2005.
13. Рені Фрієнланд Climate change in the definition of water management objectives. *Coastal&Marine*. 2014. 23(1). Pp. 8-9.
14. Мінічева Г. Г., Соколов Є. В. Оцінка природної стійкості лиманів північно-західного Причорномор'я відповідно до принципів Водної Директиви ЄС. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2014, 5 (47).
15. Тучковенко Ю. С., Козлов М. О. Водний баланс Хаджибейського лиману у сучасний період. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2017. № 21. С. 66-77.
16. Тучковенко Ю. С., Гопченко Е. Д., Адобовський В. В., Большаков В. Н. Регулювання гідроекологічного режиму Дофіновського лимана. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2008. № 3. С. 124 - 147.
17. Соколов Е. В. Интегрально-диагностическая оценка экосистемы Дофиновского лимана. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2012. № 14. С. 36-47
18. Шуйский Ю. Д., Выхованец Г. В. Природа Причерноморских лиманов: монография. Одесса: Астропринт, 2011. 276 с.
19. Бургаз М. І. Особливості формування іхтіоценозу Шаболатського лиману в умовах антропогенної трансформації водойми: дис... к-та біол. наук / ІМБ НАН України. Одеса, 2018. 189 с.
20. Попова О. М. Морфометрія та топонімія гідрологічних об'єктів Національного природного парку «Тузловські лимани». *Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*. 2016. Т. 21, вип. 2. С.64-84.
21. Іванова Н. О. Динаміка рівня водної поверхні Сасика на різних етапах існування водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. №4 (51). С. 63-75.
22. Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021-2050 / Loboda N. S., Tuchkovenko Y. S., Kozlov M. O., Katynska I. V. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*. 2021. 30(2). Pp. 315–325.
23. Тимченко В.М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья: монография / Институт гидробиологии АН Украины. Киев: Наукова думка, 1990. 240 с.
24. Кліматичний Кадастр України (електронна версія) / Державна гідрометеорологічна служба УкрНДДГМІ. Центральна Геофізична Обсерваторія. Київ, 2006.
25. Loboda N., Bozhok Y. Impact of climate change on water resources of North-Western Black Sea region. *Int. J. Res. Earth. Environ. Sci*. 2015. 2(9). Pp. 1–6.
26. The next generation of scenarios for climate change research and assessment / Moss R. H. et al. *Nature*. 2010. Vol. 463. Pp. 747-756.
27. Хохлов В. М., Серга Е. М., Недострелова Л. В. Об'єктивний вибір симуляції з ансамблю регіональних кліматичних моделей. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021. № 28. С. 29-36. <https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.03>
28. Иванов Н. Н. Об определении величин испаряемости. Москва: Изв. ГГО, 1954. С. 189 –196.
29. Модель “климат-сток” в расчетах и прогнозах водных ресурсов Украины / Гопченко Е. Д., Лобода Н. С., Божок Ю. В., Козлов М. А. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. №3(54). С. 53-54.
30. Лобода Н. С., Козлов М. О., Куза А. М. Прогностичні оцінки водних ресурсів Північно-Західного Причорномор'я у XXI сторіччі за набором кліматичних сценаріїв на базі моделі «клімат-стік». *Річки та лимани Причорномор'я на початку XXI сторіччя: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., 17-18 жовтня. Одеса. 2019. С. 100-102.*

## REFERENCES

1. Rozengurt, M.Sh. (1974). *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktsii prirodnykh resursov Odesskikh limanov [Hydrology and prospects for the reconstruction of natural resources of the Odessa lagoons]*. Kiev: Naukova dumka. (in Russ.)
2. Zaitsev, Y.P., Aleksandrov, B.G. & Minicheva, G.G. (Eds.), (2006) *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya [The North-Western Part of the Black Sea: Biology and Ecology]*. Kiev : Naukova dumka, pp. 351-255. (in Russ.)
3. Tuchkovenko, Yu.S. & Gopchenko, E.D. (eds). (2011). *Aktual'nye problemy limanov severo- zapadnogo Prichernomor'ya [Topical problems of lagoons of the North-Western Black Sea Region]*. OSENU. Odessa : TES Publ. (in Russ.)
4. Grebin, V.V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrayiny (landshafino-hidrolohichni analiz) [The modern water conditions of Ukrainian rivers (landscape-hydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
5. Tuchkovenko, Yu.S., Loboda, N.S. (eds). (2014). *Vodni resursy ta hidroekologichni stan Tylihul'skoho lymanu [Water resources and hydroecological conditions of the Tylihul'skiy Liman Lagoon]*. OSENU. Odessa : TES Publ. (in Ukr.)
6. Loboda N.S. & Gopchenko E.D. (eds). (2016). *Vodnyy rezhym ta hidroekologichni kharakterystyky Kuyal'nyts'koho lymanu [Water regime and hydroecological characteristics of Kuyal'nitskiy Liman]*. OSENU. Odessa: TES Publ. (in Ukr.)
7. Tuchkovenko, Y.S., & Tuchkovenko, O.A. (2018). The model of eutrophication of marine and estuarine ecosystems in the northwest Black Sea Region. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (21), pp. 75-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08>
8. Lloret J., Marin A. & Marin-Guirao, L. (2008). Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? *Estuar Coast Shelf Sci*, 78(2), pp. 403–412
9. Anthony, A., Atwood J., August P. et al. (2009). Coastal lagoons and climate change: ecological and social ramifications in U.S. Atlantic and Gulf coast ecosystems. *Ecology and Society*, 14(1), p.8.
10. Cataudella, S. et al. (2015). Sustainable management in Mediterranean coastal lagoons: interactions among capture fisheries, aquaculture and the environment. *Studies and reviews, No. 95, General Fisheries Commission for the Mediterranean*. Rome. Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 29-35.
11. La Jeunesse, C. Cirelli, H. Sellami et al. (2015). Is the governance of the Thau coastal lagoon ready to face cli-

- mate change impacts. *Ocean & Coastal Management*, 118, part B, pp. 234–246
12. Gönenç, I.E. & Wolflin, J.P. (eds). (2005). *Coastal lagoons: ecosystem processes and modeling for sustainable use and development*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
  13. Renñ Friedland (2014). Climate change in the definition of water management objectives. *Coastal&Marine*, 23(1), pp. 8-9.
  14. Minicheva, G.G. & Sokolov, E.V. (2014). *Estimation of the Natural Resistance of Northwestern Prichernomorje Region's Estuaries in Accordance with a Principles of EU WFD*. *Scientific reports of NULES of Ukraine*, 5 (47). (in Ukr.)
  15. Tuchkovenko, Yu.S. & Kozlov, M.O. (2017). Current water balance of Khadzhibeyskyi liman. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, 21, pp. 66-77. (in Russ.)
  16. Tuchkovenko, Y.S. et al. (2008). Management of hydroecological regimen of Dofinovka estuary. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 3, pp. 124-147. (in Russ.)
  17. Sokolov, E.V. (2012). Integrally-diagnostic estimation of the Dofinovskiy Lyman (estuary) ecosystem. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, 14, pp.36-41. (in Russ.)
  18. Shuisky, Yu.D. & Vykhovantets, G.V. (2011). *Priroda Prichernomorskih limanov [Nature of limanic coast of the Black Sea]*. Odesa : Astroprint. (in Russ.)
  19. Burhaz, M.I. (2018). *Osoblyvosti formuvannia ikhtiotsenozu Shabolatskoho lymanu v umovakh antropohennoi transformatsii vodoimy [Peculiarities of the formation of the ichthyocenosis of the Shabolat estuary in the conditions of anthropogenic transformation of the reservoir]*. Abstract of Ph.D. Thesis in Hydrobiology. Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine. Odesa. (in Ukr.)
  20. Popova, E.N. (2016). Morphometry and toponymy of the hydrological objects in the National Nature Park "Tuzlovskiy Limany". *Odesa National University Herald*, 21(2), pp. 64-84. (in Ukr.)
  21. Ivanova, N.O. (2018). The dynamics of the level of the water surface of Sasyk at different stages of the existence of the reservoir. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia. [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 4(51), pp. 63-75. (in Ukr.)
  22. Loboda, N. S. et al. (2021). Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021-2050. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 30(2), pp. 315–325.
  23. Timchenko, V.M. (1990). *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya [Environmental and Hydrological Researches into the Water Bodies in the North-Western Black Sea Region]*. Institute of Hydrobiology of NASU. Kiev: Naukova Dumka. (in Russ.)
  24. State Hydrometeorological Service of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute. Central Geophysical Observatory. (2006). *Klimatychnyi Kadastr Ukrainy (elektronna versii) [Climate Cadastre of Ukraine (electronic version)]*. Kyiv. (in Ukr.)
  25. Loboda, N. & Bozhok, Y. (2015) Impact of climate change on water resources of North-Western Black Sea region. *Int. J. Res. Earth. Environ. Sci*, 2(9), pp. 1–6.
  26. Moss R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010, vol. 463, pp. 747-756.
  27. Khokhlov, V., Serga, E., & Neodstrelova, L. (2021). Objective selection of model run from regional climate models ensemble. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (28), pp. 29-36. <https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.03> (in Ukr.)
  28. Ivanov, N.N. (1954). *Ob opredelenii velichin isparjaemosti [On determining the values of evaporation]*, *Izvestiya Glavnoy geofizicheskoy observatorii [News of the Main Geophysical Observatory]*, pp. 189–196. (in Russ.)
  29. Gopchenko, E.D, et al. (2019). Model' "klimat-stok" v raschetah i prognozakh vodnyh resursov Ukrainy [Climate-runoff model in calculations and forecasts of water resources of Ukraine]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 3 (54), pp. 53-54. (in Russ.)
  30. Loboda, N.S., Kozlov, M.O. & Kuza, A.M. (2019). [Forecast estimates of water resources of the North-Western Black Sea coast in the XXI century based on a set of climate scenarios based on the "climate-runoff" model]. *Materialy Vseukrainskoi nauково-praktichnoi konferentsii "Richky ta lymany Prychornomorja na pochatku XXI storichchia" [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Rivers and estuaries of the Black Sea at the beginning of the XXI century"]*, 17-18 October. Odesa, pp. 100-102. (in Ukr.)

## CLIMATE CHANGE IMPACT ON WATER BALANCE OF QUASI-CLOSED LAGOONS IN THE NORTH-WESTERN BLACK SEA COAST

**Yu. Tuchkovenko, V. Khokhlov, N. Loboda**

*Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, tuch2001@ukr.net*

The paper studies the impact of regional climate changes that occurred in the past and are expected to occur in the near future on the components of the annual fresh water balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast. Currently these lagoons have no permanent connection with the sea. However, there are some episodic connections via artificially created channels, ducts and other waterworks. The value of insufficiency of the studied lagoons' annual fresh water balance is used as an indicator of their ecosystems' sensitivity to climate change. Action plans must be created and implemented for the lagoons that are the most sensitive to changes in regional climatic conditions in order to achieve and maintain their "good"

environmental quality status.

The climate-induced changes of meteorological parameters in the North-Western Black Sea coast that determine the components of the lagoons' water balance are estimated for two periods: the current one from 2000 to 2018 (based on the observations made at coastal meteorological stations) and the near-future one of 2021-2050 which is compared to the 1961-1990 period (based on the data of the Climate Cadastre of Ukraine). The expected climatic conditions in the near future (2021-2050) were determined by the RCM simulations of the Euro-CORDEX project for the RCP4.5 climate change scenario.

The research evaluates the components of the lagoons' fresh water balance (precipitation reaching the lagoons' water surface, fresh water inflow from the catchments, evaporation from the lagoons' water surface) and identifies the residuals (shortages) of annual balance. It uses the "climate-runoff" hydrological model for the above climatic periods to determine the fresh water inflow into the lagoons through the watercourses of their catchment areas. The annual evaporation layer from the lagoons' water surface was evaluated using the long-term average monthly values of temperature and relative humidity for each of the periods.

It was established that the climatic changes that occurred earlier and those expected in the current century caused and will cause the increasing insufficiency of the annual fresh water balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast. This can threaten salinization, shallowing or even disappearance of some lagoons. Thus new strategies for water and environmental management of such lagoons must be developed. In terms of vulnerability to climate changes leading to significant annual insufficiency of fresh water balance (if there are no other water sources, e.g. water from the sea), lagoons are ranked in the following order: Kuialnytskyi Lagoon, Dofinivskyi Lagoon, Budatskyi Lagoon (if there is no water inflow from the Dniistrovskyi Lagoon), the Tuzla group of lagoons, Sasyk Lagoon, Tyligulskyi Lagoon, Hadzhybeisky Lagoon (if there is no anthropogenic runoff).

**Keywords:** the North-Western Black Sea coast; quasi-closed lagoons; climate change; fresh water balance; insufficiency

*Подання до редакції : 23. 05. 2022*

*Надходження остаточної версії : 05. 06. 2022*

*Публікація статті : 07. 07. 2022*