

УДК 551.468.4

**РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОРІЧНОЇ МІНЛИВОСТІ
ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КУЯЛЬНИЦЬКОГО ЛИМАНУ
ЗА РІЗНИХ ОБСЯГІВ СТОКУ РІЧКИ ВЕЛИКИЙ КУЯЛЬНИК****Ю. С. Тучковенко**, д-р геогр. наук,**Д. В. Кушнір**,**Н. С. Лобода**, д-р геогр. наук*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, science@odeku.edu.ua*

За результатами розрахунків з використанням прогностичної тривимірної гідротермодинамічної моделі Delft3D-FLOW отримані оцінки змін внутрішньорічної просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману за різних обсягів надходження до нього стоку річки Великий Куяльник. Моделювались варіанти збільшення надходження стоку річки до 25% та 75% від обсягів щомісячного природного стоку річки за умов 2015 року, а також для різних за водністю типових років сучасного кліматичного періоду XXI ст. (1990-2030 рр.), визначених за найбільш виправданим для регіону Куяльницького лиману кліматичним сценарієм з бази даних ENSEMBLES, який відповідає глобальному сценарію A1B, розрахованому за моделлю MPI-REMO. При моделюванні використовувались щомісячні значення природного стоку р. В. Куяльник, розраховані із використанням моделі «клімат-стік». Встановлено, що провадження водного менеджменту на водозборі річки Великий Куяльник, реалізація різних інженерно-технічних заходів, спрямованих на збільшення стоку річки в Куяльницький лиман, будуть суттєво впливати на його гідроекологічний режим лише у разі забезпечення надходження до лиману не менш 75% від обсягів природного стоку річки. Збільшення природного стоку річки В. Куяльник не здатне самостійно забезпечити стабілізацію гідроекологічного режиму Куяльницького лиману без періодичного поповнення його морською водою Одеської затоки. За відсутності поповнення лиману морськими водами та стоком інших малих водотоків, які впадають в лиман, збільшення стоку р. В. Куяльник навіть до 75 % від обсягів природного стоку може забезпечити стабілізацію річного циклу мінливості рівня та солоності води в лимані лише в багатоводні роки.

Ключові слова: Чорне море, Куяльницький лиман, річковий стік, гідрологічний режим, гідродинамічне моделювання.

1. ВСТУП

Куяльницький лиман належить до групи закритих лиманів північно-західного Причорномор'я і є унікальним водним об'єктом загальнодержавного значення, віднесеним до категорії лікувальних. Він має значні лікувальні, бальнеологічні, рекреаційні, туристичні природні ресурси, які становлять потужний потенціал для соціально-економічного розвитку Одеської агломерації і здатні чинити суттєвий позитивний вплив на розвиток рекреації, охорони здоров'я та економіки всієї країни. Однак, в останнє десятиріччя, через активну нерегульовану антропогенну (у тому числі водогосподарську) діяльність на водозборі Куяльницького лиману, посилення посушливості клімату, відсутність ефективної системи комплексного управління (інтегрованого управління природокористуванням за басейновим принципом), виникла загроза повного зникнення лиману та

втрати запасів унікальних лікувальних грязей і ропи, а також своєрідної флори і фауни водойми. Обумовлено це катастрофічним обмілінням лиману, зменшенням як площі його водної поверхні, так і об'єму вод, і, як наслідок, збільшенням солоності ропи вище 300‰, припиненням процесу утворення лікувальних грязей.

Для запобігання загрозі повного висихання лиману та втрати його природних ресурсів, засоленню ґрунтів прилеглих територій, у грудні 2014 року була введена в експлуатацію водопропускна система, через яку протягом останніх років Куяльницький лиман поповнюється морською водою з Одеської затоки в зимово-весняний період року. Хоча поповнення лиману морською водою в сучасних умовах є необхідним і виправданим кроком для збереження його природних ресурсів, але в довгостроковій перспективі воно буде призводити до накопичення в

ньому солей. Тому наступним кроком, передбаченим «Регіональною програмою збереження та відновлення водних ресурсів у басейні Куяльницького лиману на 2012-2018 рр.», є відновлення припливу прісних вод з водозбірного басейну лиману, насамперед стоку річки В. Куяльник, шляхом регулювання водогосподарської діяльності на її водозборі. Однак, зважаючи на зменшення стоку річки у XXI ст. внаслідок зміни кліматичних умов [1], необхідно визначити доцільність та ефективність цього заходу відносно можливого впливу на гідроекологічний режим Куяльницького лиману.

Метою роботи є оцінка на підставі результатів математичного моделювання впливу потенційно можливого у сучасних кліматичних умовах збільшення стоку р. В. Куяльник на внутрішньорічну просторово-часову мінливість гідрологічних характеристик Куяльницького лиману, які обумовлюють хімічні та біологічні процеси у ньому, і, таким чином, впливають на властивості ропи та лікувальних грязей. Для вирішення цієї задачі використовувалась нестационарна тривимірна чисельна гідротермодинамічна модель Delft3D-FLOW [2, 3], результати адаптації та верифікації якої до умов Куяльницького лиману опубліковані в роботі [4].

Детальний опис змін кліматичних, гідрологічних та гідроекологічних характеристик поверхневих вод в басейні Куяльницького лиману, які відбулись внаслідок змінення клімату та водогосподарської діяльності на початку XXI ст., наведений в [1]. Там же наведені оцінки водних ресурсів річок, які живлять лиман, у природних та порушених водогосподарською діяльністю умовах в сучасності та за кліматичними сценаріями.

Опис гідрологічного режиму Куяльницького лиману та особливостей мінливості його характеристик у XX столітті, до початку прояву кліматичних змін (з кінця 80-х років), викликаних глобальним потеплінням, приведено в роботах [5, 6]. Багаторічна мінливість складових водного балансу, рівня та солоності води в лимані за період спостережень з 70-х років XIX ст. до 2009 р. показана в [7].

2. ОПИС ГІДРОТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

Модель Delft3D-FLOW базується на чисельному вирішенні рівняння Нав'є-Стокса для нестисливої рідини на мілкій воді у наближенні Бусінеска. Система диференціальних прогностичних рівнянь моделі складається з рівнянь руху у

горизонтальній площині, рівняння нерозривності, рівнянь переносу тепла та солей, а також двопараметричної k - ϵ -моделі турбулентності [8], що замикає ці рівняння. Вертикальні компоненти векторів швидкості течій розраховуються через рівняння нерозривності. Для рівняння швидкості вертикального руху береться гідростатичне наближення. Рівняння стану морської води визначається за формулою ЮНЕСКО [9].

Тепло- та масообмін з атмосферою розраховуються в моделі з використанням напівемпіричних формул [10, 11]. Випаровування з водної поверхні E розраховується в моделі як сума випаровування під дією вимушеної конвекції E_{FORC} та випаровування при вільній конвекції E_{FREE} .

Випаровування під дією вимушеної конвекції визначається наступним чином

$$E_{FORC} = \rho_a f(U_{10}) \{q_s(T_s) - q_a(T_a)\}, \quad (1)$$

де ρ_a – густина повітря; q_s – масова частка водяної пари у насиченому повітрі (біля водної поверхні); q_a – масова частка водяної пари у повітрі на висоті 10 м;

$$q_s(T_s) = \frac{0,62 e_s}{P_{atm} - 0,38 e_s}, \quad (2)$$

$$q_a(T_a) = \frac{0,62 e_a}{P_{atm} - 0,38 e_a}, \quad (3)$$

де P_{atm} – атмосферний тиск; e_s – тиск насиченої водяної пари; e_a – тиск водяної пари на висоті 10 м.

Тиск насиченої водяної пари e_s та тиск водяної пари на висоті 10 м e_a розраховуються в моделі відповідно до наступних відношень:

$$e_s = 10^{\frac{0,7859 + 0,03477 T_s}{1 + 0,00412 T_s}}, \quad (4)$$

$$e_a = r_{hum} 10^{\frac{0,7859 + 0,03477 T_a}{1 + 0,00412 T_a}}, \quad (5)$$

де r_{hum} – відносна вологість повітря, %; T_s – температура поверхневого шару води, С; T_a – температура повітря, С.

Функція швидкості повітря на висоті 10 м $f(U_{10})$ у формулі (1) визначається як

$$f(U_{10}) = c_e U_{10}, \quad (6)$$

де c_e – число Дальтона (калібрувальний коефіцієнт); U_{10} – швидкість вітру на висоті 10 м, м/с.

Випаровування при вільній конвекції розраховується наступним чином

$$E_{FREE} = k_S \bar{\rho}_a \{q_s(T_s) - q_a(T_a)\} \quad (7)$$

$$k_S = \begin{cases} 0, & \rho_{a10} - \rho_{a0} \leq 0 \\ C_{FR.CON.} \left\{ \frac{g\alpha^2}{v_{air}\rho_a} (\rho_{a10} - \rho_{a0}) \right\}^{1/3}, & \rho_{a10} - \rho_{a0} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

де $C_{FR.CON.}$ – коефіцієнт вільної конвекції, який калібрується; ρ_{a0} – густина насиченої водяної пари (біля водної поверхні), кг/м^3 ; ρ_{a10} – густина повітря на висоті 10 м, кг/м^3 ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; v_{air} – в'язкість повітря, яка приймається рівною константі $16,0 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$; α – молекулярна дифузія повітря, що визначається як

$$\alpha = \frac{v_{air}}{\sigma}, \quad (9)$$

де $\sigma = 0,7$ – число Прандтля (для газів).

Густина насиченої водяної пари ρ_{a0} та густина повітря на висоті 10 м ρ_{a10} у формулі (8) розраховуються відповідно до наступних залежностей:

$$\rho_{a0} = \frac{\frac{100P_{atm} - 100e_s}{R_{dry}} + \frac{100e_s}{R_{vap}}}{T_s + 273,15}, \quad (10)$$

$$\rho_{a10} = \frac{\frac{100P_{atm} - 100e_a}{R_{dry}} + \frac{100e_a}{R_{vap}}}{T_a + 273,15}, \quad (11)$$

де $R_{dry} = 287,05 \text{ Дж/(кг К)}$ – газова стала для сухого повітря; $R_{vap} = 461,495 \text{ Дж/(кг К)}$ – газова стала для пари.

Для врахування впливу солоності води лиману на інтенсивність випаровування з його водної поверхні, розраховане в моделі випаровування помножувалось на корегувальний коефіцієнт відповідно до емпіричної залежності, наведеної в [12]

$$E_S = E \times (0,75 + 0,25 e^{-0,065 \cdot S}), \quad (12)$$

де S – солоність води у поверхневому шарі, у %.

Ступінь прозорості води, яка впливає на інтенсивність поглинання короткохвильової радіації у водному стовпі, задається в моделі як константа.

Кінцево-різницева апроксимація рівнянь мо-

де $\bar{\rho}_a$ – середня густина повітря, кг/м^3 ; k_S – коефіцієнт теплопередачі, який розраховується за залежністю:

делі виконана на криволінійній розрахунковій сітці С-типу за класифікацією Аракави: скалярні величини задаються в центрах елементарних розрахункових осередків, а нормальні компоненти швидкості течій – на їх відповідних гранях. Часовий крок рішення рівнянь обмежується умовою стабільності Куранта-Фрідрікса-Леві.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ, ОПИС ВХІДНИХ ДАНИХ

Для проведення гідродинамічного моделювання була побудована підігнана до меж акваторії лиману криволінійна розрахункова сітка, яка складалась з 39×270 розрахункових осередків у горизонтальній площині (рис. 1а). Розміри розрахункових осередків сітки плавно змінюються у межах 60-280 м вздовж повздовжньої вісі лиману та 40-210 м – у поперечному напрямку. По вертикалі задавались три розрахункових рівня у криволінійній σ -системі координат. Глибини в лимані, приведені до позначки рівня води мінус 4,8 м БС (рис. 1б), задавались на основі оцифрованої карти Одеської області масштабу 1:25000 та плану Куяльницького лиману в ізобатах, побудованого за результатами батиметричної зйомки 2009 р.

Програмна реалізація чисельних рівнянь моделі дозволила враховувати під час проведення модельних розрахунків висихання-затоплення окремих мілководних ділянок ложа лиману при змінах рівня води у ньому.

Оскільки умови формування мінливості характеристик гідроекологічного режиму Куяльницького лиману протягом 2015 р. (обсяги надходження морських вод, стік річок малих водотоків в лиман, добові суми опадів на поверхню лиману) точно визначені за даними спостережень [4], то безсумнівний інтерес представляє кількісна оцінка змін, які відбулися би за умови попередньої реалізації різних водогосподарських заходів щодо збільшення стоку р. В. Куяльник.

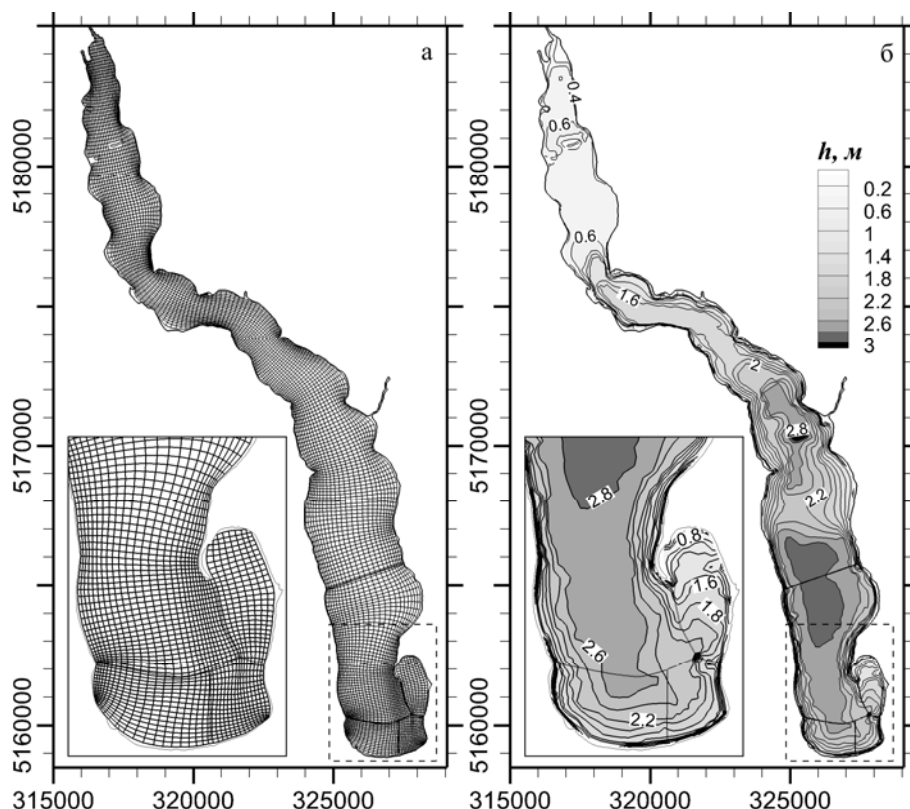


Рис. 1 – Криволінійна розрахункова сітка для акваторії Куяльницького лиману (а)*. Батиметрія лиману (б)**.

* На осях координат – відмітки сітки Універсальної поперечної проєкції Меркатора (UTM) з кроком 1000 м, зона 36 N.

** Глибини в лимані, показані на рисунку контурами та цифрами, відповідають відмітці рівня води мінус 4,8 м БС.

Моделювалась мінливість гідрологічних характеристик в лимані на відрізьку часу з 22.12.2014 р. по 01.11.2015 р. Початок періоду моделювання відповідав моменту відкриття водопропускної гідротехнічної системи, що дозволяє поповнювати Куяльницький лиман морською водою з Одеської затоки.

При моделюванні враховувались наступні прихідні складові водного балансу лиману: обсяги надходження морських вод в лиман через гідротехнічну споруду (водопропуск), стік річок В. Куяльник, Довбока, Кубанка; стік з Корсунцівської, Гільдендорфської балок та через лотки з ВНС № 5 і ставків пересипу, добові суми опадів на акваторію лиману за даними спостережень на метеопосту «Одеса-Куяльник» [4]. Витрати прісних вод через водотоки, які впадають в лиман, морських вод через водопропуск, солоність морських вод задавались на підставі даних вимірювань фахівців Одеського державного екологічного університету (ОДЕКУ).

Крім спостережених у 2015 р. значень витрат води р. В. Куяльник, при моделюванні використовувались оцінки середньомісячних витрат її

природного та побутового стоку в лиман за умов 2015 р., розраховані за моделлю «клімат-стік» [1] (табл. 1). Зауважимо, що спостережені витрати річки значно менші за розраховані значення її побутового стоку (рис. 2), що є наслідком впливу різних перешкод для стоку у руслі річки, зокрема, заростання її русла рослинністю, наяв-

Таблиця 1 – Розраховані за моделлю «клімат-стік» середньомісячні витрати природного та побутового стоку р. В. Куяльник за умов 2015 р.

№ з/п	Місяць року	Витрати води Q , м ³ /с	
		Природний стік	Побутовий стік
1.	Січень	0.102	0,0131
2.	Лютий	0.247	0,0318
3.	Березень	0.742	0,0955
4.	Квітень	1.88	0,242
5.	Травень	0.247	0,0318
6.	Червень	0.24	0,0309
7.	Липень	0.113	0,0145
8.	Серпень	0	0
9.	Вересень	0	0
10.	Жовтень	0	0
11.	Листопад	0	0
12.	Грудень	0.069	0,0131
	Середні за рік	0.303	0,039

ності штучної дамби, створеної протиправно. Часова мінливість напрямку та швидкості вітру, температури та вологості повітря, балу хмарності у період моделювання задавались з дискретністю 3 години за даними спостережень на ГМС «Одеса-ГМО» [4].

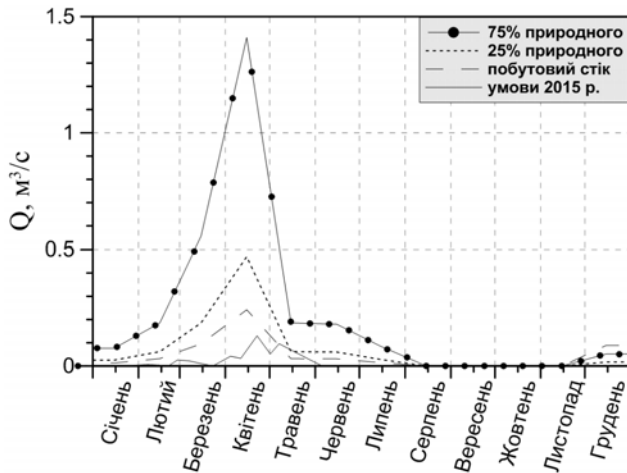


Рис. 2 – Середньомісячні витрати р. В. Куяльник у 2015 р., які задавались при моделюванні.

Окрім гідрометеорологічних умов 2015 року, моделювання внутрішньорічної мінливості гідрологічних характеристик лиману виконувалось для різних за водністю типових років сучасного кліматичного періоду XXI ст. (1990-2030 рр.), визначених за найбільш виправданим для регіону Куяльницького лиману кліматичним сценарієм з бази даних ENSEMBLES, який відповідає глобальному сценарію A1B, розрахованому за моделлю MPI-REMO Інституту метеорології ім. Макса Планка (Гамбург, Німеччина) [13, 14]. Як типові за гідрометеорологічними умовами були обрані: 2018 р. – маловодний; 2025 р. – середньоводний, 2021 р. – багатоводний рік. Ряди середньодобових значень температури, відносної вологості повітря, швидкості та напрямку вітру, балу загальної хмарності та атмосферних опадів, отримані з бази даних ENSEMBLES (сценарій A1B моделі MPI-REMO) для кожного з обраних типових років, використовувались для завдання граничних умов на верхній (з атмосферою) границі розрахункової області моделі. При розрахунках використовувались щомісячні значення природного стоку р. В. Куяльник, розраховані за моделлю «клімат-стік» для різних за водністю типових років сучасного кліматичного періоду XXI ст., проінтерпольовані з кроком 3 години для засвоєння моделлю.

4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СЦЕНАРНИХ РОЗРАХУНКІВ ЗБІЛЬШЕННЯ НАДХОДЖЕННЯ СТОКУ РІЧКИ В. КУЯЛЬНИК В ЛИМАН ЗА УМОВ 2015 РОКУ

Для оцінки змін показників гідроекологічного режиму Куяльницького лиману на підставі результатів гідротермодинамічного моделювання, розглядались наступні варіанти надходження стоку р. В. Куяльник в лиман:

- спостережені у 2015 р. середньомісячні витрати річки;
- розраховані за моделлю «клімат-стік» середньомісячні витрати побутового стоку річки;
- середньомісячні витрати, які відповідають 25% природного стоку річки, розрахованого за моделлю «клімат-стік»;
- середньомісячні витрати, які відповідають 75% природного стоку, розрахованого за моделлю «клімат-стік».

Річна мінливість середньомісячних витрат стоку р. В. Куяльник, використана при моделюванні вказаних варіантів, наведена на рис. 2. При визначенні можливих обсягів збільшення надходження до лиману стоку р. В. Куяльник вважалося, що впровадження водного менеджменту на водозборі не дозволить на 100 % відновити природний стік річки.

Результати моделювання аналізувались в 4-х обраних контрольних точках на акваторії Куяльницького лиману (рис. 3).

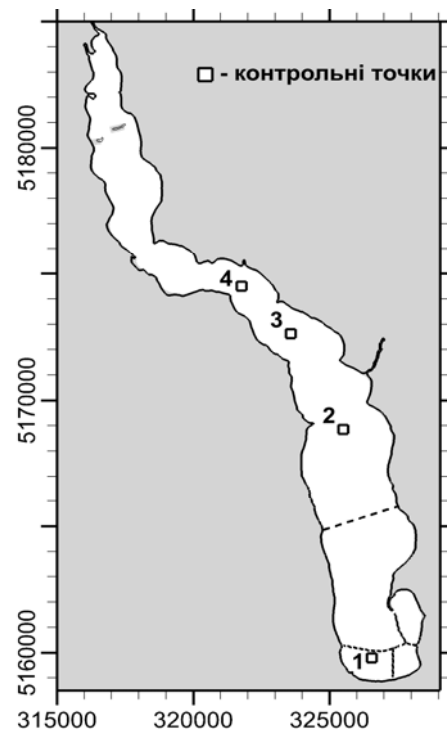


Рис. 3 – Схема розташування контрольних точок для аналізу результатів моделювання на акваторії Куяльницького лиману.

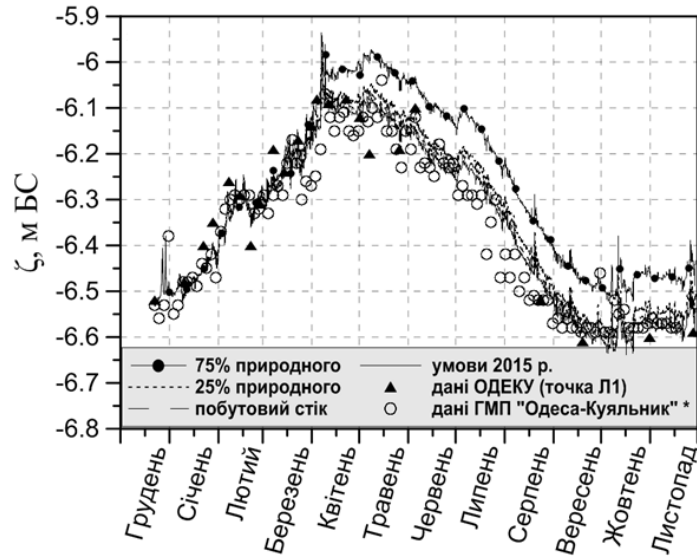


Рис. 4 – Внутрішньорічна мінливість відміток рівня води, м БС, у Куяльницькому лимані за даними натурних спостережень (точки) та отримана в результаті моделювання за різними варіантами надходження стоку р. В. Куяльник у 2015 р. – контрольна точка №1.

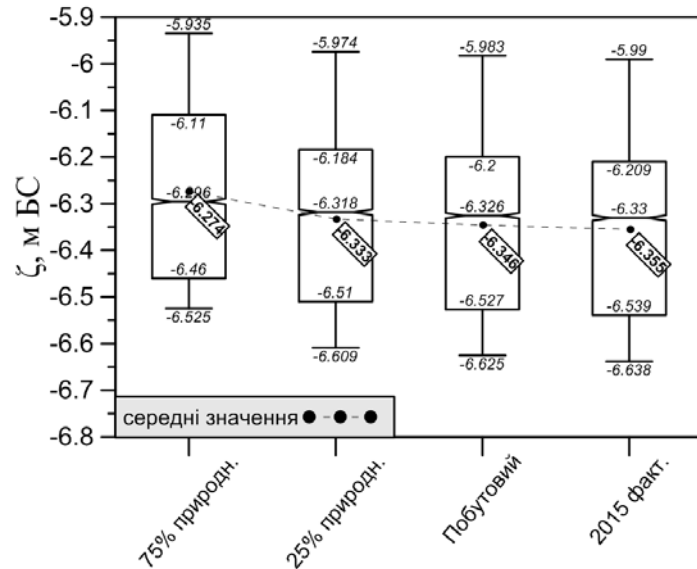


Рис. 5 – Характеристики річної мінливості відмітки рівня води в лимані, м БС, за різними варіантами надходження стоку р. В. Куяльник у 2015 р. Приведені значення 0,25 та 0,75-квантилей, медіанні (риски), середні (точки), мінімальні (нижні вуса) та максимальні (верхні вуса) значення.

На рис. 4-5 наведені результати моделювання мінливості відміток рівня води в лимані протягом 2015 р. за різними варіантами збільшення стоку річки В. Куяльник. Видно, що лише забезпечення надходження до лиману 75 % від обсягів природного стоку річки призводить до суттєвого підвищення рівня води в ньому. Це підвищення на 0,08-0,1 м формується протягом квітня-травня і зберігається до кінця розрахункового періоду.

Результати розрахунків просторово-часової мінливості солоності вод на акваторії Куяльницького лиману за різними варіантами надходження стоку річки Великий Куяльник при гідрометеорологічних умовах 2015 р. наведені на

рис. 6-7.

З рис. 7 видно, що забезпечення надходження в лиман 75 % від природного стоку річки В. Куяльник призведе до відповідного зменшення середньорічних значень солоності води: на 21 % – в південній частині (точка 1) і 24-28 % – в центральній і північній частинах (точки 2, 3), порівняно з базовим (фактичним) варіантом для 2015 р. У разі забезпечення надходження в лиман лише 25 % природного стоку, середньорічні значення солоності води зменшилися би лише на 7-9% на основній глибокій частині акваторії лиману (точки 1-3) і на 2,4% – на мілководній ділянці північної частини (точка 4).

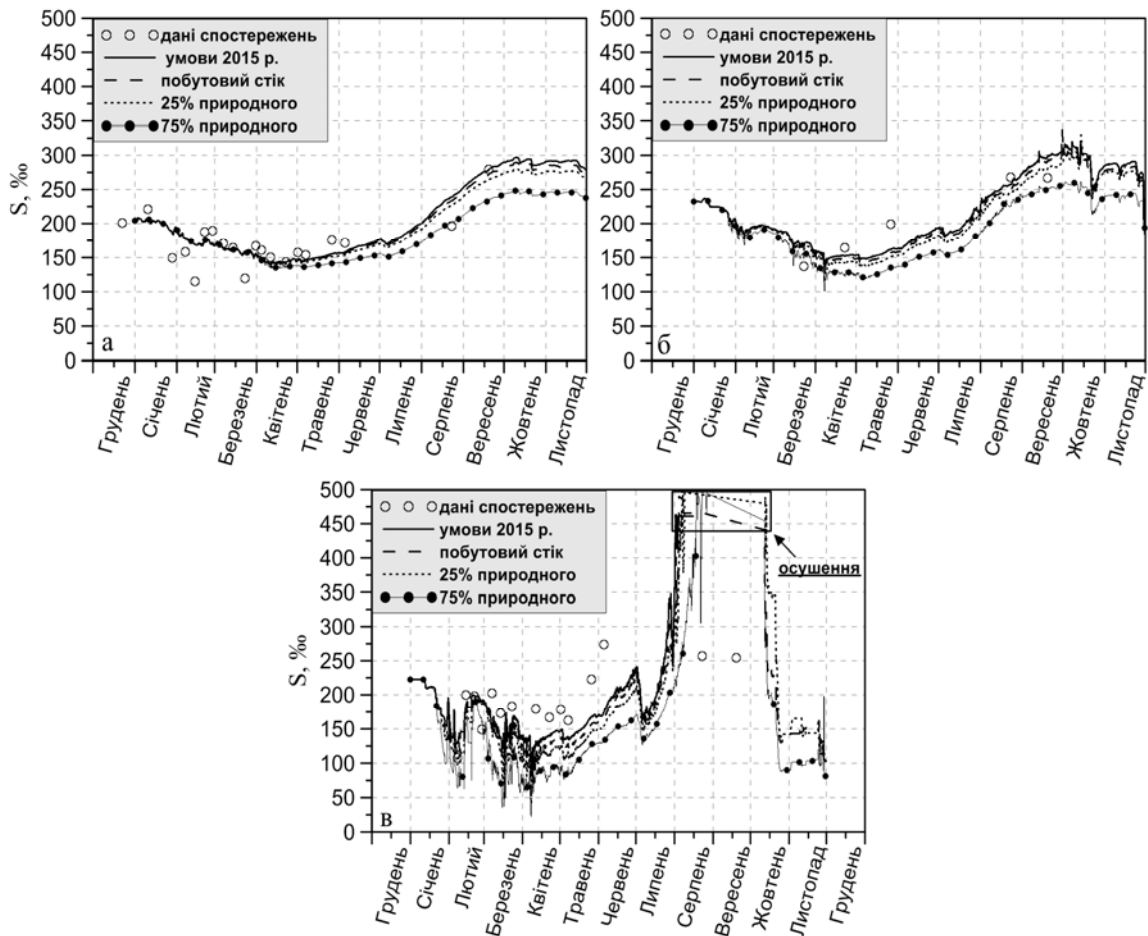


Рис. 6 – Часова мінливість солоності води в Куяльницькому лимані протягом 2015 р. за даними натурних спостережень (точки) та отримана в результаті моделювання за різними варіантами надходження стоку р. В. Куяльник у 2015 р.: а – контрольна точка №1; б – №3; в – №4. Позначка «осушення» – оголення ложа лиману внаслідок зменшення рівня води.

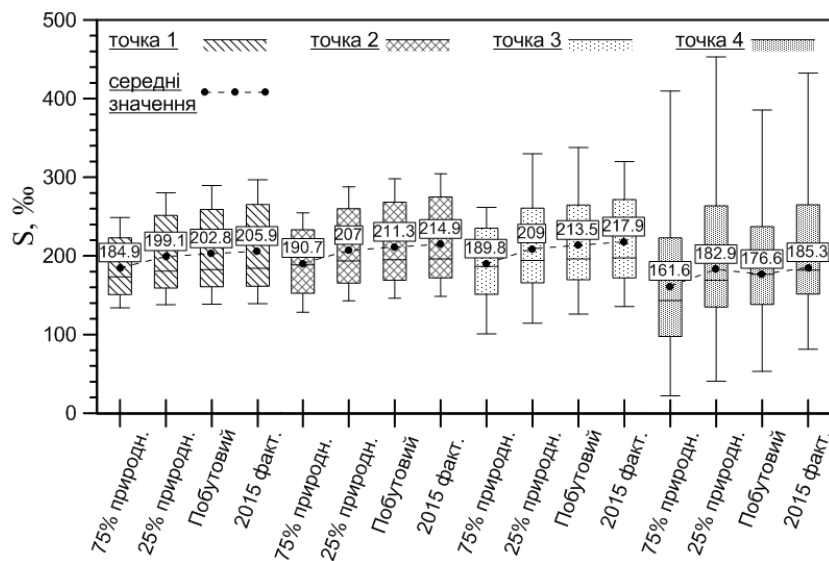


Рис. 7 – Характеристики просторово-часової мінливості солоності вод лиману, ‰, отримані в результаті моделювання за різними варіантами надходження стоку р. В. Куяльник у 2015 р. Приведені значення 0,25 та 0,75-квантилей, медіанні, середні (точки), мінімальні (нижні вуса) та максимальні (верхні вуса) значення

Таблиця 2 – Середньомісячні витрати річки В. Куяльник при забезпеченні надходження до Куяльницького лиману 25 % та 75 % від обсягів її природного стоку, розрахованого за моделлю «клімат-стік» для різних за водністю типових років сучасного кліматичного періоду

№ з/п	Місяць року	Витрати води Q , м ³ /с, у відсотках від розрахованого природного стоку в роки різної водності					
		Маловодний		Середньоводний		Багатоводний	
		75%	25%	75%	25%	75%	25%
1.	Січень	0	0	0,119	0,040	0,371	0,124
2.	Лютий	0,001	0	0,289	0,096	0,626	0,209
3.	Березень	0,002	0,001	0,866	0,289	2,834	0,945
4.	Квітень	0,004	0,002	2,191	0,730	6,281	2,094
5.	Травень	0,002	0,001	0,289	0,096	0,676	0,226
6.	Червень	0,001	0	0,280	0,094	0,626	0,208
7.	Липень	0	0	0,131	0,044	0,511	0,170
8.	Серпень	0	0	0	0	0,371	0,124
9.	Вересень	0	0	0	0	0	0
10.	Жовтень	0	0	0	0	0	0
11.	Листопад	0	0	0	0	0,013	0,004
12.	Грудень	0	0	0,081	0,027	0,460	0,153
	За рік:	0,001	0	0,354	0,118	1,064	0,354

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ МІНЛИВОСТІ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КУЯЛЬНИЦЬКОГО ЛИМАНУ ДЛЯ РІЗНИХ ЗА ВОДНІСТЮ ТИПОВИХ РОКІВ СУЧАСНОГО КЛІМАТИЧНОГО ПЕРІОДУ

Моделювання внутрішньорічної мінливості гідрологічних характеристик лиману для різних за водністю типових років сучасного кліматичного періоду XXI ст. (1990-2030 рр.) виконувалось за наступних умов: надходження до лиману морських вод та стік малих водотоків в лиман протягом року вважалися відсутніми; стік річки В. Куяльник дорівнював 25 % та 75 % від щомісячних витрат при природному стоці (табл. 2), який був розрахований за стохастичною моделлю «клімат-стік».

Наведені на рис. 8-9 результати моделювання внутрішньорічної мінливості відміток рівня води в лимані в різні за водністю роки сучасного кліматичного періоду свідчать, що при забезпеченні надходження в лиман 25 % обсягів розрахованого для них природного стоку р. В. Куяльник стабілізація рівня відбуватиметься лише за умов багатоводного року; у маловодний рік відмітка рівня води в лимані наприкінці року буде на 0,4 м нижчою за початкову, а в середній за водністю рік – нижчою на 0,25 м. У разі забезпечення надходження в лиман 75 % обсягів природного стоку р. В. Куяльник, розрахованого для років різної водності, у маловодний рік відмітка рівня води в лимані наприкінці року також буде

на 0,4 м нижчою за початкову, в середній за водністю рік – нижчою на 0,15 м, а у багатоводний рік, навпаки, підвищиться на 0,3 м порівняно з початковою.

Результати розрахунків внутрішньорічної мінливості солоності води в Куяльницькому лимані в різні за водністю роки сучасного кліматичного періоду наведені на рис. 10-12. В цілому, вони свідчать про те, що збільшення стоку р. В. Куяльник навіть до 75% від обсягів природного стоку здатне забезпечити стабілізацію річного циклу мінливості солоності води в лимані лише в багатоводні роки. У всіх інших розглянутих випадках солоність води в лимані наприкінці року буде значно більшою, ніж початкова. Виникне міжрічна тенденція значного підвищення солоності вод лиману. У маловодні роки, коли навіть природний стік р. В. Куяльник майже відсутній, у вересні відбудеться розділення основного ложа лиману на дві відокремлені водойми (рис. 12б).

Результати моделювання річної мінливості температури води в різних точках на акваторії Куяльницького лиману свідчать, що в багатоводні роки температура води завжди нижча, ніж в середньоводні та маловодні. Води мілководної північної ділянки лиману (точка 4 на рис. 3) завжди прогриваються більше, ніж на більш глибоких ділянках лиману. Збільшення стоку р. В. Куяльник впливає на температурний режим лиману, хоча і незначно.

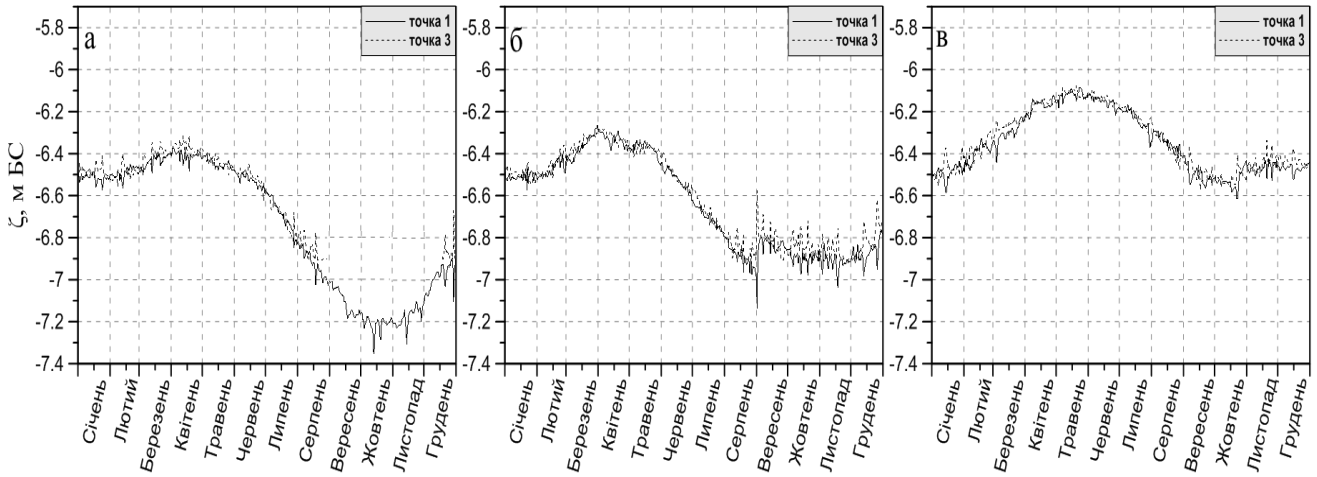


Рис. 8 – Змодельована внутрішньорічна мінливість відмітки рівня води, м БС, у Куяльницькому лимані в контрольних точках 1 та 3 для маловодного (2018) (а), середнього за водністю (2025) (б) та багатоводного (2021) (в) типового року сучасного кліматичного періоду XXI ст. (1990-2030 рр.) за умови надходження до лиману 25% від обсягів природного річкового стоку.

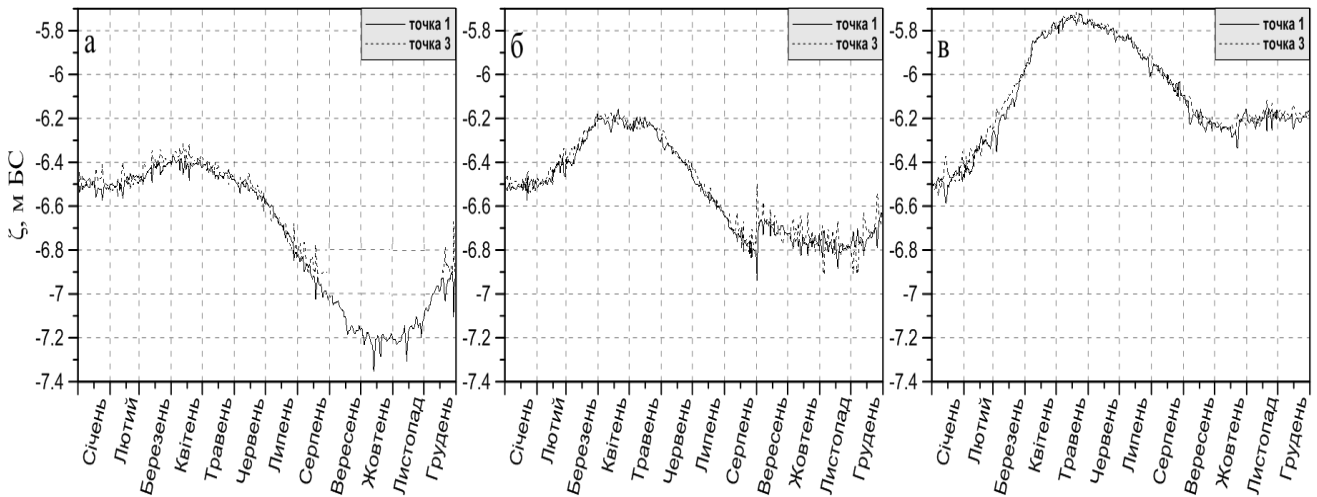


Рис. 9 – Змодельована внутрішньорічна мінливість відмітки рівня води, м БС, у Куяльницькому лимані в контрольних точках 1 та 3 для маловодного (2018) (а), середнього за водністю (2025) (б) та багатоводного (2021) (в) типового року сучасного кліматичного періоду XXI ст. (1990-2030 рр.) за умови надходження до лиману 75% від обсягів природного річкового стоку.

6. ВИСНОВКИ

За результатами розрахунків з використанням прогностичної тривимірної гідротермодинамічної моделі Delft3D-FLOW отримані оцінки змін внутрішньорічної просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману за різних обсягів надходження до нього стоку річки Великий Куяльник.

Встановлено, що:

- провадження водного менеджменту на водозборі річки Великий Куяльник, реалізація різних інженерно-технічних заходів, спрямованих на збільшення стоку річки в Куяльницький лиман, будуть суттєво впливати на його гідроеко-

логічний режим лише у разі забезпечення надходження до лиману не менш 75% від обсягів природного стоку річки;

- за гідрометеорологічних умов 2015 р., збільшення стоку річки В. Куяльник до 75 % від обсягів її природного стоку призвело б до підвищення рівня води в лимані на 0,08-0,1 м, зменшення середньорічних значень солоності води: на 21 % – в південній частині (точка 1) і 24-28 % – в центральній і північній частинах лиману, порівняно з фактично спостереженими у 2015 р. значеннями;

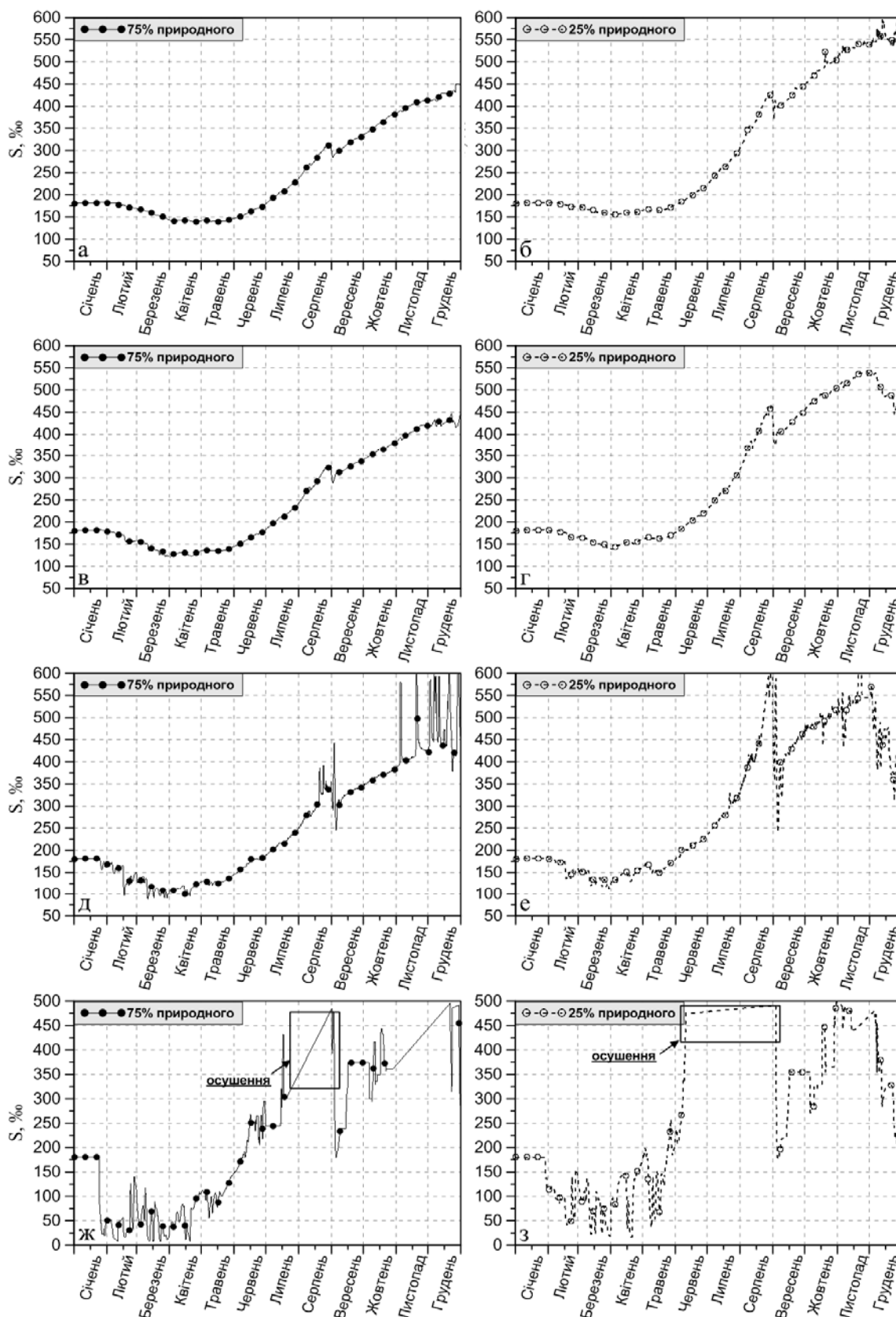


Рис. 10 – Отримана в результаті моделювання часова мінливість солоності поверхнього шару вод Куяльницького лиману протягом середнього за водністю 2025 року (75% та 25% природного стоку): а, б – контрольна точка №1; в, г – контрольна точка №2; д, е – контрольна точка №3; ж, з – контрольна точка

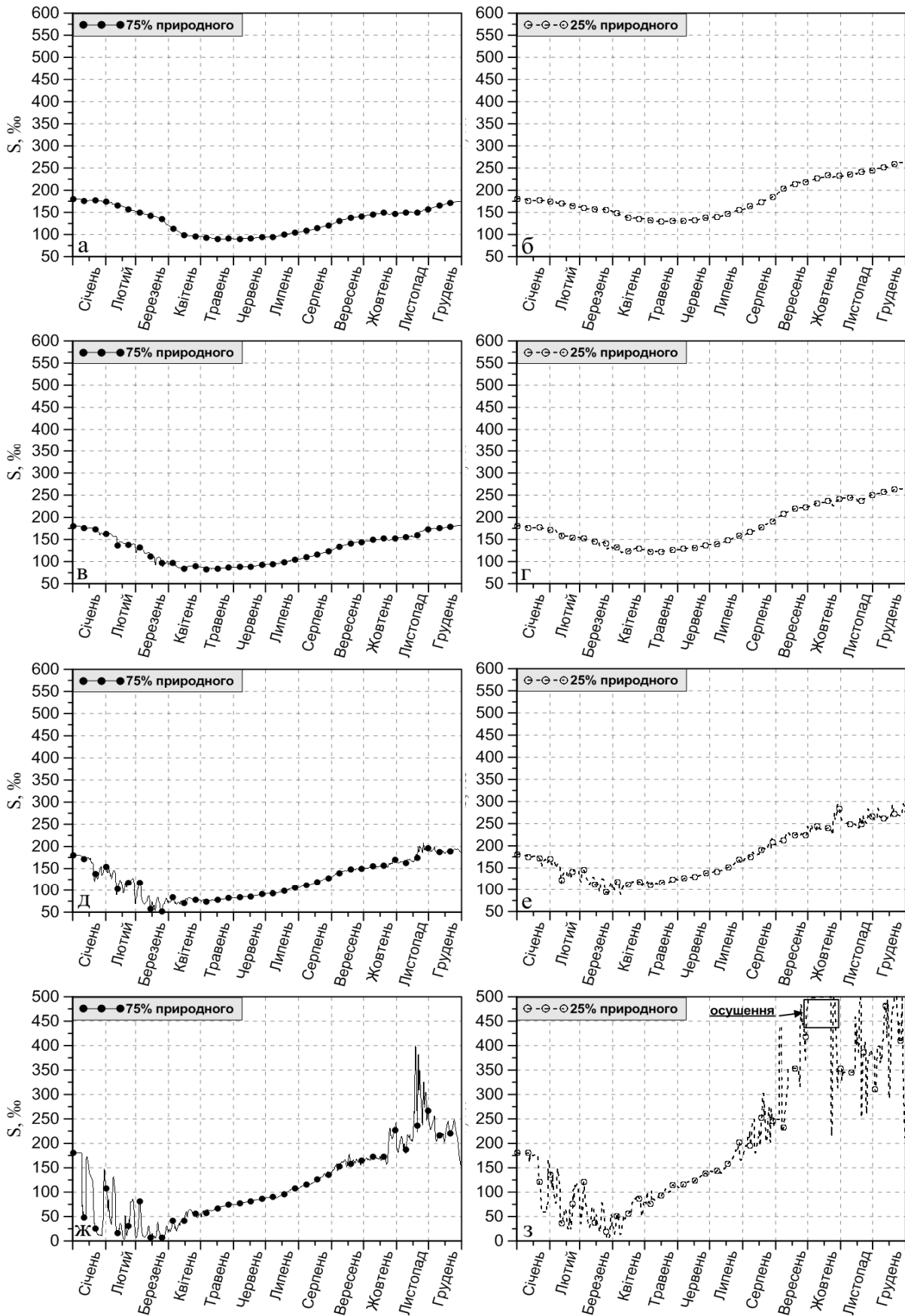


Рис. 11 – Отримана в результаті моделювання часова мінливість солоності поверхнього шару вод Куяльницького лиману протягом багатоводного 2021 року (75% та 25% природного стоку): а, б– контрольна точка №1; в, г – контрольна точка №2; д, е – контрольна точка №3; ж, з – контрольна точка №4.

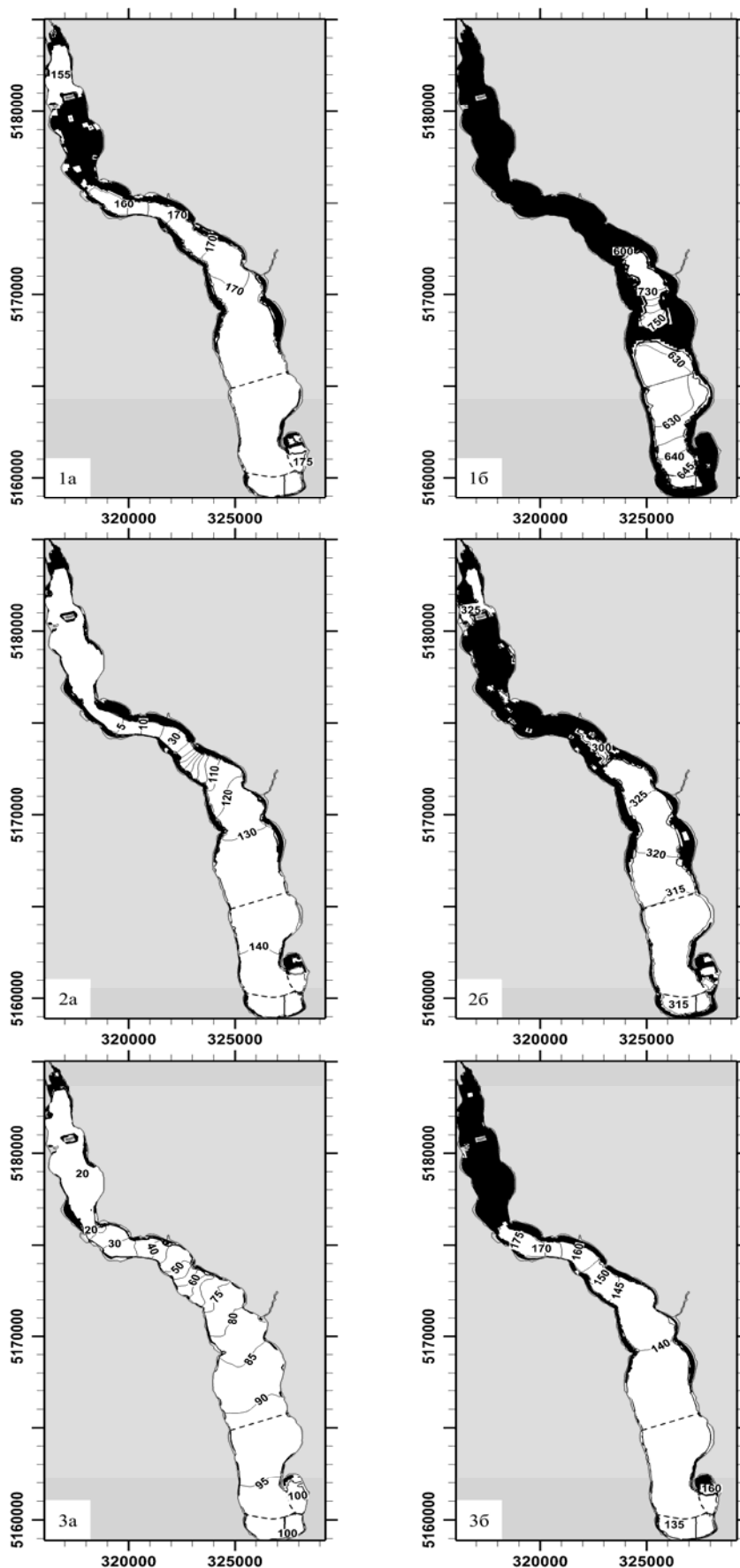


Рис. 12 – Змодельована мінливість просторового розподілу солоності вод лиману, ‰, та меж його водного дзеркала за умов надходження 75% обсягів розрахованого природного стоку р. В. Куяльник у різні типові роки сучасного кліматичного періоду XXI ст.: 1 – маловодний 2018 р.; 2 – середній за водністю 2025 р.; 3 – багатоводний 2021 р.; а) 15 квітня; б) 15 вересня.

– збільшення природного стоку річки В. Куяльник не здатне самостійно забезпечити стабілізацію гідроекологічного режиму Куяльницького лиману без періодичного поповнення його морською водою Одеської затоки та здійснення заходів щодо стабілізації та збільшення надходження вод від інших водотоків, які впадають в лиман: малих річок Довбока, Кубанка, балок Гільдендорфська та Корсунцівська;

– за відсутності поповнення лиману морськими водами та стоком інших малих водотоків, які впадають в лиман, збільшення стоку р. В. Куяльник навіть до 75 % від обсягів природного стоку здатне забезпечити стабілізацію річного циклу мінливості рівня та солоності води в лимані лише в багатоводні роки;

– в багатоводні роки температура води в лимані завжди нижча, ніж в середньоводні та маловодні; води мілководної північної ділянки лиману завжди прогриваються сильніше, ніж на більш глибоких ділянках лиману; збільшення стоку р. В. Куяльник впливає на температурний режим лиману, хоча і незначно.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Водний режим та гідроекологічні характеристики Куяльницького лиману: монографія / за ред. Н. С. Лободи, Є. Д. Гопченка; Од. держ. еколог. ун-т. Одеса: ТЕС, 2016. 332 с.
2. Deltares, 2016. *Delft3D 4.01 Suite*. Available through: Delft3D Open Source Community <<http://oss.deltares.nl/web/delft3d/>>. [Accessed 17 February 2016].
3. Deltares, 2014. *Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual, Hydro-Morphodynamics, Version 3.15.34158*. [pdf] Delft, The Netherlands: Deltares systems. Available at: <http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf>. [Accessed 17 February 2016].
4. Тучковенко Ю. С., Кушнір Д. В. Результати чисельного моделювання внутрішньорічної мінливості характеристик гідрологічного режиму Куяльницького лиману // Укр. гідрометеорол. ж. 2016. № 17. С. 137 – 149. URL: <http://uhmj.odeku.edu.ua/uk/category/2016-uk/17-uk>.
5. Розенгурт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов Одесских лиманов: монография. Киев: Наукова думка, 1974. 224 с.
6. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья: монография / Ин-т гидробиологии АН УССР. Киев: Наукова думка, 1990. 240 с.
7. Актуальные проблемы лиманов северо-западного При-

- черноморья: монография / под ред. Ю. С. Тучковенко, Е. Д. Гопченко; Од. гос. экол. ун-т. Одесса: ТЕС, 2012. С. 149-168.
8. Burchard H., Baumert H. On the performance of a mixed layer model based on the k-ε turbulence closure. *Journal of Geophysical Research (C5)*, 1995, no. 100, pp. 8523-8540.
 9. Millero Frank J., Poisson Alain, Chen Chen Tung, Bradshaw Alvin L., Schleicher K. Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater. *Unesco technical papers in marine science*, 38, 1980, Publ: 1981; 192 p.
 10. Gill Adrian E. *Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series*. Academic Press, 1982, vol.30. 680 p.
 11. Lane A. The heat balance of the North Sea. *Tech. Rep. 8*, Proudman Oceanographic Laboratory, 1989, pp. 243, 254.
 12. Панин Г. Н., Брезгунов В. С. О влиянии солёности воды на ее испарение // Известия РАН. Физика атмосферы и океан. 2007. Том 43. № 5. С. 718-720.
 13. Wörner V., Hesse C., Stefanova A., Krysanova V. *Evaluation of climate scenarios for the lagoons*. Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2012. 40 p.
 14. ENSEMBLES Project. Available through: <<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>>. [Accessed 27 March 2016].

REFERENCES

1. Loboda N. S., Gopchenko E. D. (Eds). *Vodnyy rezhym ta hidroekologichni kharakterystyky Kuyal'nyts'koho lymanu* [Water regime and hydroecological characteristics of Kuyal'nitskyi Liman]. OSENU. Odessa: TES, 2016. 332 p.
2. Deltares, 2016. *Delft3D 4.01 Suite*. Available through: Delft3D Open Source Community <<http://oss.deltares.nl/web/delft3d/>>. [Accessed 17 February 2016].
3. Deltares, 2014. *Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual, Hydro-Morphodynamics, Version 3.15.34158*. [pdf] Delft, The Netherlands: Deltares systems. Available at: <http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf>. [Accessed 17 February 2016].
4. Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D. V. Results of the numerical modelling of the annual variability of characteristics of the hydrological regime of the Kuialnitskyi Lyman Lagoon. *Ukr. gidrometeorol. ž. – Ukr. hydrometeor. J.*, 2016, no. 17, pp. 137-148. Available through: <<http://uhmj.odeku.edu.ua/en/category/2016-en/17-en>>. (In Ukrainian)
5. Rozengurt M. Sh. *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktsii prirodnikh resursov Odesskikh limanov* [Hydrology and Prospects for Natural Resources Rearrangement in the Lagoons of the Odessa Region]. Kiev: Naukova dumka, 1974. 224 pp.
6. Timchenko V. M. *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya* [Environmental and Hydrological Researches into the Water Bodies in the North-Western Black Sea Region]. Kiev: Naukova Dumka, Institute of Hydrobiology of NASU, 1990. 240 p.
7. Tuchkovenko Yu. S., Gopchenko E. D. (Eds). *Aktual'nye*

- problemy limanov severo-zapadnogo Prichernomor'ya* [Topical problems of lagoons of the North-Western Black Sea Region]. OSENU. Odessa: TES, 2011, pp. 149-168.
8. Burchard H., Baumert H. On the performance of a mixed layer model based on the $k-\varepsilon$ turbulence closure. *Journal of Geophysical Research (C5)*, 1995, no. 100, pp. 8523-8540.
 9. Millero Frank J., Poisson Alain, Chen Chen Tung, Bradshaw Alvin L., Schleicher K. Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater. *Unesco technical papers in marine science*, 38, 1980, Publ: 1981. 192 p.
 10. Gill Adrian E. *Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series*. Academic Press, 1982, vol. 30. 680 p.
 11. Lane A. The heat balance of the North Sea. *Tech. Rep. 8*, Proudman Oceanographic Laboratory, 1989, pp. 243, 254.
 12. Panin G. N., Brezgunov V. S. Influence of the salinity of water on its evaporation. *Izvestiya RAN. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2007, vol. 43, no. 5, pp. 663–665. (In Russian)
 13. Wörner V., Hesse C., Stefanova A., Krysanova V. *Evaluation of climate scenarios for the lagoons*. Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2012. 40 p.
 14. ENSEMBLES Project. Available through: <http://ensemblesrt3.dmi.dk/>. [Accessed 27 March 2016].

RESULTS OF THE NUMERICAL MODELLING OF INTRA-ANNUAL VARIABILITY OF HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE KUIALNYTSKYI LYMAN LAGOON UNDER VARIOUS RUNOFF VOLUMES OF THE VELYKYI KUIALNYK RIVER

Yu. S. Tuchkovenko, Doctor of Geographical Sciences,

D. V. Kushnir

N. S. Loboda, Doctor of Geographical Sciences

*Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, science@odeku.edu.ua*

Assessments of changes in the intra-annual spatio-temporal variability of the hydrological characteristics of the Kuialnytskyi Lyman lagoon under various runoff volumes of the Velykyi Kuialnyk River were obtained from the results of calculations, using the predictive three dimensional hydrothermodynamic model Delft3D-FLOW.

Scenarios of increasing the river runoff inflow up to 25% and 75% of the monthly natural river runoff under conditions of 2015 were modelled, as well as under different by hydraulicity typical years of the modern climatic period of the 21st century (1990-2030), determined according to the most appropriate for the Kuialnytskyi Lyman lagoon region climatic scenario from the ENSEMBLES database, which corresponds to the global A1B scenario, calculated by the MPI-REMO model. Monthly values of the natural runoff of the Velykyi Kuialnyk River, calculated with the use of “climate-runoff” model, were used during the simulation.

Implementation of water management within the catchment area of the Velykyi Kuialnyk River and realization of various engineering and technical measures aimed at the increase of river inflow to the Kuialnytskyi Lyman lagoon, are identified to significantly affect the hydroecological regime of the lagoon only in case of supplying at least 75% of the natural river runoff volume into the lagoon.

The increase of the natural runoff of the Velykyi Kuialnyk River is incapable to provide the stabilization of the hydroecological regime of the Kuialnytskyi Lyman lagoon independently, without periodical replenishment of the lagoon with seawater from the Odessa Gulf.

Under the absence of replenishment of the lagoon with sea water and deficiency in the runoff of other small water streams flowing into the lagoon, the increase of the runoff of the Velykyi Kuialnyk River even up to 75% of the volume of its natural runoff could provide the stabilization of the annual cycle of water level and salinity variability in the lagoon only during the high-water years.

Keywords: the Black Sea, the Kuialnytskyi Lyman lagoon, river runoff, hydrological regime, hydrodynamic modelling.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КУЯЛЬНИЦКОГО ЛИМАНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕМАХ СТОКА РЕКИ БОЛЬШОЙ КУЯЛЬНИК

Ю. С. Тучковенко, д-р геогр. наук,
Д. В. Кушнир, Н. С. Лобода, д-р геогр. наук

*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, science@odeku.edu.ua*

По результатам расчетов с использованием прогностической трехмерной гидротермодинамической модели Delft3D-FLOW получены оценки изменений внутригодовой пространственно-временной изменчивости гидрологических характеристик Куяльницкого лимана при различных объемах поступления в него стока реки Большой Куяльник. Моделировались варианты увеличения поступления стока реки до 25% и 75% от объемов ежемесячного природного стока реки в условиях 2015 года, а также для различных по водности типовых лет современного климатического периода XXI в. (1990-2030 гг.), определенных по наиболее оправданному для региона Куяльницкого лимана климатическому сценарию из базы данных ENSEMBLES, который соответствует глобальному сценарию A1B, рассчитанному по модели MPI-REMO. При моделировании использовались ежемесячные значения природного стока р. Б. Куяльник, рассчитанные с использованием модели «климат-сток». Установлено, что проведение водного менеджмента на водосборе реки Большой Куяльник, реализация различных инженерно-технических мероприятий, направленных на увеличение стока реки в Куяльницкий лиман, будут существенно влиять на его гидроэкологический режим только в случае обеспечения поступления в лиман не менее 75% от объемов природного стока реки. Увеличение природного стока реки Б. Куяльник не способно самостоятельно обеспечить стабилизацию гидроэкологического режима Куяльницкого лимана без периодического пополнения его морской водой Одесского залива. При отсутствии пополнения лимана морскими водами и стоком других малых водотоков, впадающих в лиман, увеличение стока р. Б. Куяльник даже до 75% от объемов природного стока может обеспечить стабилизацию годового цикла изменчивости уровня и солености воды в лимане только в многоводные годы.

Ключевые слова: Черное море, Куяльницкий лиман, речной сток, гидрологический режим, гидродинамическое моделирование.

Дата першого подання: 11. 03. 2016

Дата надходження остаточної версії: 07. 07. 2017

Дата публікації статті: 26. 10. 2017