

УДК 551.468.4

**РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОРІЧНОЇ МІНЛИВОСТІ
ХАРАКТЕРИСТИК ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ КУЯЛЬНИЦЬКОГО ЛИМАНУ****Ю.С. Тучковенко, д.геогр.н.,
Д.В. Кушнір***Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, science@odeku.edu.ua*

Для вирішення задачі діагнозу та прогнозу просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману (рівня, солоності, температури води), які обумовлюють хімічні та біологічні процеси у ньому, і, таким чином, впливають на властивості рапи та лікувальних грязей, застосована нестационарна тривимірна чисельна гідротермодинамічна модель Delft3D-FLOW. Наведені в роботі результати адаптації до умов Куяльницького лиману та верифікації моделі свідчать про можливість її використання для дослідження особливостей і прогнозування просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману під впливом природних та антропогенних чинників, які формують його гідрологічний режим. Показана важлива роль врахування при моделюванні малих водотоків, які впадають в лиман, та точного завдання інтенсивності зливових атмосферних опадів. Визначено, що при штормових вітрах повздовжніх по відношенню до акваторії лиману напрямків, різниця відміток рівня води в північній та південній його частинах може досягати 0,35-0,4 м.

Ключові слова: Куяльницький лиман, 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 надати серйозний 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 загрози зникнення лиману та втрати його природних ресурсів, засоленню

грунтів прилеглих територій, у грудні 2014 року була введена в експлуатацію водопропускна система, яка дозволила поповнювати Куяльницький лиман морською водою з Одеської затоки. Згідно із завданнями «Регіональної програми збереження та відновлення водних ресурсів у басейні Куяльницького лиману на 2012-2018 рр.», наступним кроком на шляху реабілітації лиману повинен стати комплекс природоохоронних заходів, спрямованих на збільшення надходження до нього прісних вод зі стоком р. Великий Куяльник та інших малих річок і балок, розташованих на водозборі лиману.

З огляду на вищевказане, особливої актуальності набуває задача відтворення та прогнозування просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману (рівня, солоності, температури води), які обумовлюють хімічні та біологічні процеси у ньому, і, таким чином, впливають на властивості ропи та лікувальних грязей.

Оскільки моніторинг проводиться епізодично, в обмеженій кількості точок на акваторії лиману, то для вирішення поставленої задачі доцільно використовувати методи чисельного математичного моделювання.

Метою роботи є представлення і обговорення результатів адаптації до умов Куяльницького лиману та верифікації тривимірної чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D-FLOW [1,

2]. Задача, яка вирішувалась, – визначення можливостей застосування вказаної моделі для діагнозу і прогнозу просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик лиману за умов водогосподарських перетворень на його водозбірному басейні, різних режимів поповнення лиману морською водою з Одеської затоки, зміни кліматичних чинників.

Об'єктом дослідження є гідрологічний режим Куяльницького лиману, а предметом дослідження – просторово-часова внутрішньорічна мінливість гідрологічних характеристик лиману за результатами спостережень та моделювання.

Опис гідрологічного режиму Куяльницького лиману та особливостей мінливості його характеристик у ХХ столітті, до початку прояву кліматичних змін (з кінця 80-х років), викликаних глобальним потеплінням, приведено в роботах [3, 4]. Багаторічна мінливість складових водного балансу, рівня та солоності води в лимані за період спостережень з 70-х років ХІХ ст. до 2009 р. показана в [5]. Аналіз водного балансу лиману та багаторічної мінливості його складових в період 1960-2007 рр. виконаний в [6]. Чинники, які формують сучасний гідрохімічний режим Куяльницького лиману та впливають на його екологічний стан, розглянуті в роботах [7, 8]. Зокрема, в [8], на підставі узагальнення результатів багаторічних (2000-2013 рр.) комплексних гідролого-гідрохімічних, гідробіологічних і геохімічних досліджень компонентів водної і наземної екосистеми Куяльницького лиману та динаміки їх міжрічних змін, виявлені причини та відображені наслідки деградації природних компонентів. Розглянуто аспекти зниження ресурсного потенціалу лиману і прибережних територій в умовах кліматичних змін та антропогенного впливу.

Гідродинамічне моделювання для акваторії Куяльницького лиману раніше виконувалось лише в [9], з використанням моделі МЕССА [10], при вирішенні окремої задачі прогнозування просторо-часової мінливості солоності вод в лимані під час надходження до нього морських вод.

2. ОПИС ГІДРОТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

Модель Delft3D-FLOW базується на чисельному рішенні 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 і солей, а також з двопараметричної $k-\varepsilon$ -моделі турбулентності [11], яка

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 [12].

Тепло- та масообмін з атмосферою розраховуються в моделі з використанням напівемпіричних формул [13, 14]. Випаровування з водної поверхні розраховується в моделі як сума випаровування під дією вимушеної конвекції та випаровування при вільній конвекції. Ступінь прозорості води, яка впливає на інтенсивність поглинання короткохвильової радіації у водному стовпі, задається в моделі як константа.

Кінцево-різницева апроксимація рівнянь моделі 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. АДАПТАЦІЯ МОДЕЛІ ДО УМОВ КУЯЛЬНИЦЬКОГО ЛИМАНУ: УМОВИ, ВИХІДНІ ДАНІ, РЕЗУЛЬТАТИ

Для проведення гідродинамічного моделювання була побудована узгоджена з межами акваторії лиману ортогональна криволінійна розрахункова сітка, яка складалась з 39×270 розрахункових осередків у горизонтальній площині (рис. 1б). 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. 1а), задавались на основі векторизованих карт Одеської області масштабів 1:25000, 1:100000 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 осушення-затоплення окремих мілководних ділянок ложа лиману при змінах рівня води у ньому.

Адаптація моделі до умов Куяльницького лиману була виконана із використанням архівних гідрометеорологічних даних для двох обраних екстремальних років: 1987 р. та 2003 р. У 1987 р. стік р. Великий Куяльник в лиман був майже відсутній; невеликий стік (із витратами до

1,54 м³/с) спостерігався лише наприкінці березня – на початку квітня. У 2003 р., навпаки, мала місце найбільша за останні десятиріччя повінь: витрати річки В. Куяльник досягали 34,5 м³/с наприкінці березня (рис. 2а,б).

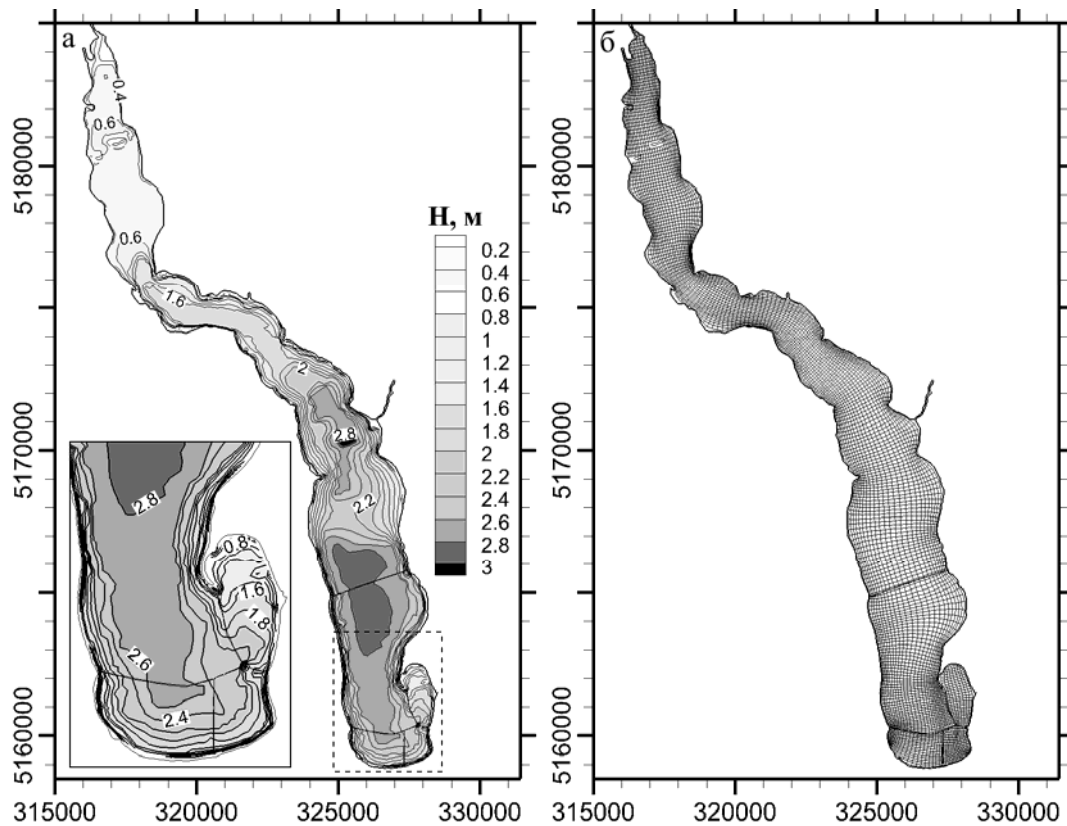
При розрахунках, на верхній (з атмосферою) межі розрахункової області задавались: часова мінливість відносної вологості, температури повітря, балу хмарності, напряму та швидкості вітру, кількості атмосферних опадів з дискретністю 3 години за даними спостережень на гідрометстанції (ГМС) «Одеса-ГМО» (рис. 2в-л). Випаровування з водної поверхні розраховувалось в самій моделі. Витрати р. В. Куяльник задавались за даними щодобових спостережень на водомірному посту «Северинівка».

Значення коефіцієнтів рівнянь моделі, які використовувались при розрахунках, були визначені під час калібрування (табл. 1).

Часовий крок рішення рівнянь моделі приймався рівним 30 с. Початкові умови для модельних розрахунків (відмітка рівня води у лимані, температура, солоність води) задавались на основі даних спостережень та приймались однаковими у просторі.

Для верифікації моделі використовувались дані спостережень за рівнем, температурою (тільки у 1987 р.) та солоністю води в Куяльницькому лимані, які були організовані в ці роки Одеською гідрогеологічною режимно-експлуатаційною станцією (ГРЕС) Одеського відділення АТ «Укрпрофздравниця».

Для умов 1987 р. (рис. 3) модель відтворила з достатньою точністю мінливість гідрологічних характеристик у лимані лише з початку травня. За умов відсутності стоку р. В. Куяльник, врахування атмосферних опадів як єдиної прихідної складової водного балансу лиману не дозволило забезпечити підвищення рівня води, яке спостерігалось в період з 08.02.1987 р. по 26.02.1987 р. Отримані результати свідчать, з одного боку, про коректність розрахунку випаровування з поверхні лиману, в результаті якого знижувався рівень води в літньо-осінній період, а, з іншого боку, – про існування інших (окрім стоку р. В. Куяльник та атмосферних опадів) прихідних складових водного балансу лиману в період його весняного наповнення.



На осях координат – відмітки сітки Універсальної поперечної проекції Меркатора (UTM) з кроком 1000 м, зона 36N. Глибини на карті відповідають відмітці рівня моря мінус 4,8 м БС.

Рис. 1 – Батиметрична карта акваторії Куяльницького лиману (а). Криволінійна розрахункова сітка (б)

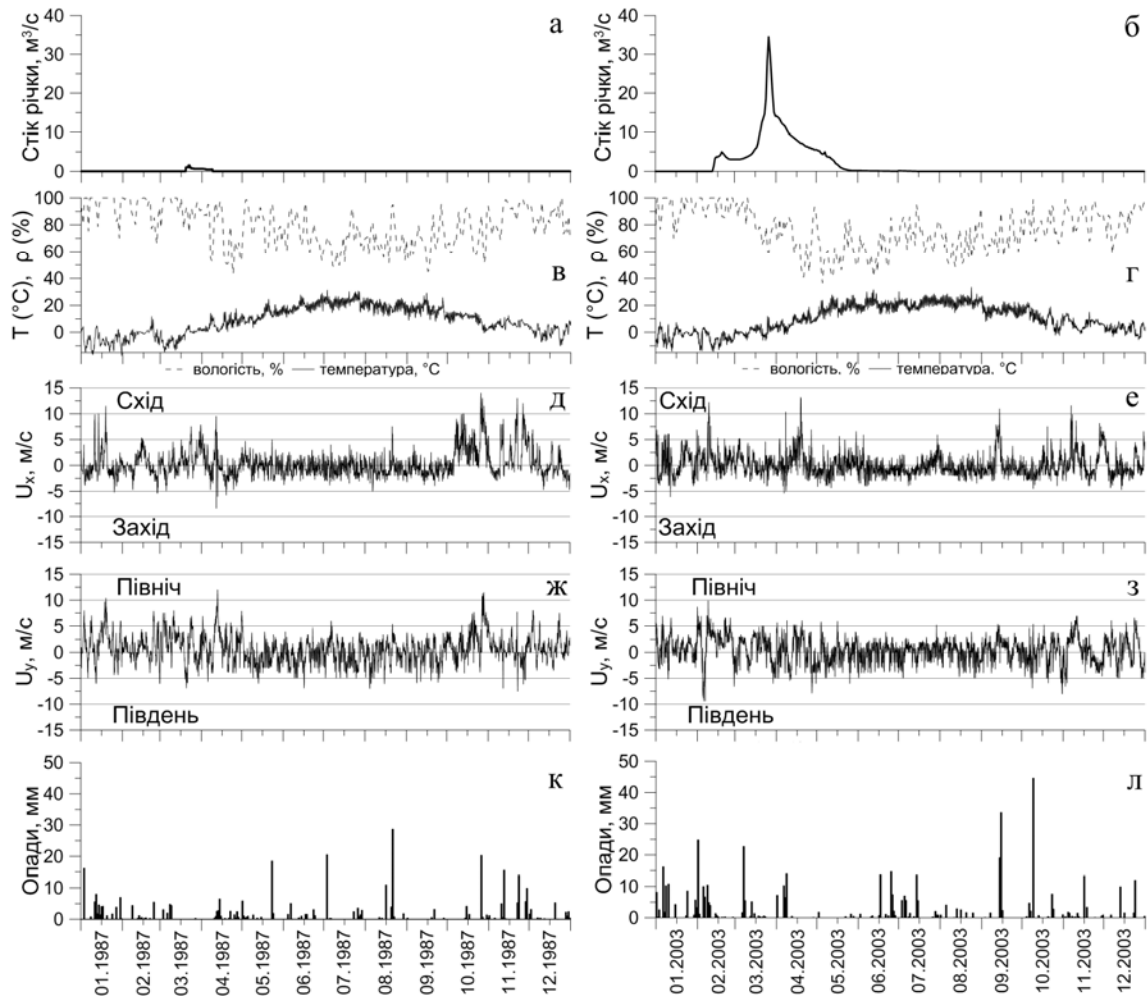


Рис. 2 – Вхідні дані, що використовувались під час адаптації моделі: часова мінливість витрат р. В. Куяльник, м³/с (а, б); температури, °С, вологості повітря, % (в, г); компоненти вектору швидкості вітру, м/с, у напрямках «схід-захід» (д, е) та «північ-південь» (ж, з); добовий шар атмосферних опадів, мм (к, л)

Таблиця 1 - Значення основних коефіцієнтів моделі, визначені під час її калібрування

№ з/п	Назва параметру	Значення, що використовувалось	Джерело
1.	Глибина Секкі, м	0,1	[7]
2.	Коефіцієнт поверхневого вітрового тертя	Лінійна функція зі значеннями $1,255 \times 10^{-3}$ та $2,425 \times 10^{-3}$ при швидкостях вітру 7 та 25 м/с відповідно	[15]
3.	Коефіцієнт Маннінга, м ^{-1/3} с, для розрахунку параметру донного тертя	$1,8 \times 10^{-2}$	[16]
4.	Пороговий коефіцієнт горизонтальної турбулентної в'язкості, м²/с	10	[2, 17]
5.	Пороговий коефіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії, м²/с	10	[2, 17]
6.	Пороговий коефіцієнт вертикальної турбулентної в'язкості, м²/с	1×10^{-6}	[2]
7.	Пороговий коефіцієнт вертикальної турбулентної дифузії, м²/с	0	[2]
8.	Число Дальтона для розрахунку випаровування при вимушеній конвекції	$1,6 \times 10^{-3}$	[18]
9.	Число Стентона для розрахунку втрат тепла при контактному теплообміні з атмосферою	$2,0 \times 10^{-2}$	[18]
10.	Коефіцієнт вільної конвекції для розрахунку випаровування при вільній конвекції	0,4	[18]



Рис. 3 – Мінливість рівня води, м БС (а), солоності, ‰ (б), температури води, °С (в), в Куяльницькому лимані у 1987 р. за даними натурних спостережень (точки) та отримана в результаті моделювання (криві)

Для умов 2003 р. (рис. 4) модель задовільно відтворила фазу наповнення лиману у березні-квітні та пов'язане з нею зменшення солоності. Однак, у вхідній інформації для моделювання не враховані чинники, мінливість яких призвела до різкого (на 0,25 м) падіння рівня води, а потім до його зростання (на 0,3 м), протягом червня. Слід відзначити, що модель правильно відтворила інтегровану за цей період тенденцію зміни рівня води в лимані та до початку вересня вийшла на спостережені значення.

Наведені результати розрахунків свідчать, що у вхідній інформації для моделювання враховуються не всі прибуткові складові водного балансу лиману, які визначають мінливість рівня води у ньому. Це, в свою чергу, призводить до виникнення похибок у розрахунках мінливості солоності води. До числа неврахованих складових водного балансу лиману можна віднести надходження зливових та стічних вод зі ставків пересипу через водостік під Окружною дорогою [19], стік зі схилів, а також стік по тимчасових водотоках яружно-балкової системи лиману [7].

4. ВАЛІДАЦІЯ МОДЕЛІ: ВИХІДНІ ДАНІ, ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Валідація моделі проводилась за умов 2015 р. Моделювалась мінливість гідрологічних характеристик в лимані на відрізку 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 прибуткові 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 (рис. 5), добові суми опадів на акваторію лиману (рис. 6). 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).

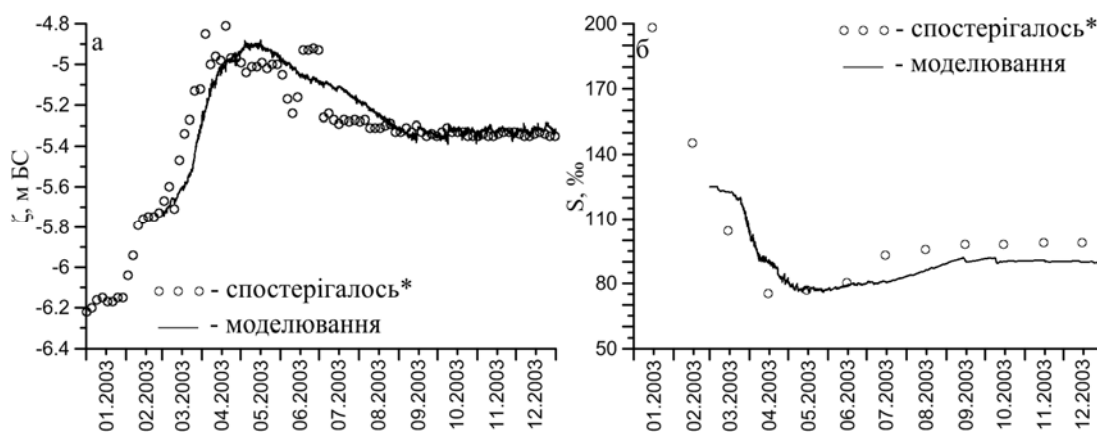


Рис. 4 – Мінливість рівня, м БС (а), та солоності води, ‰ (б), в Куяльницькому лимані у 2003 р. за даними натурних спостережень (точки) та отримана в результаті моделювання (криві)

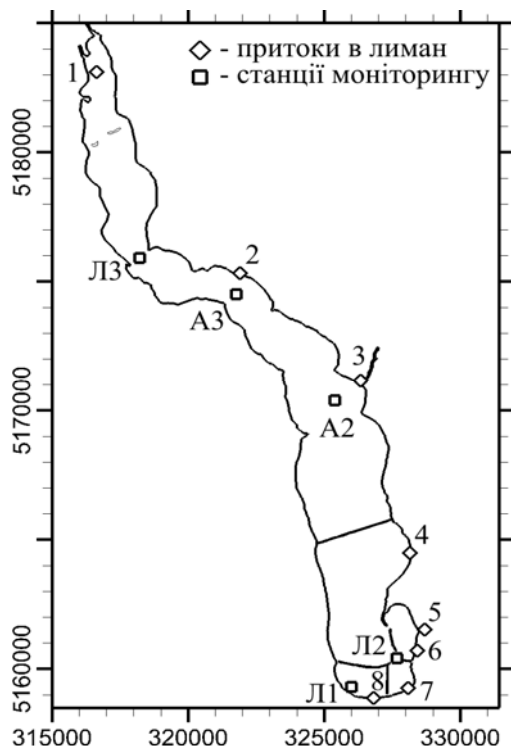


Рис. 5 – Схема розташування станцій моніторингу ОДЕКУ на акваторії Куяльницького лиману (позначені А2, А3, Л1, Л2, Л3) та притоках до лиману у 2015 р.: 1 – р. В. Куяльник; 2 – р. Довбока; 3 – р. Кубанка; 4 – б. Гільдендорфська; 5 – б. Корсунцівська; 6 – лоток з ВНС № 5; 7 – водопропуск «лиман-море»; 8 – лоток зі ставків пересипу

З рис. 7 видно, що у 2015 р. надходження прісних вод до лиману зі стоком р. В.Куяльник було значно меншим, ніж зі стоком інших водотоків. В певній мірі це пов'язано з тим, що гирло р. В.Куяльник влітку і до жовтня 2015 р. було перекрито штучною дамбою, створеною проти-правно.

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» (рис. 6).

Для верифікації результатів модельних розрахунків використовувались дані систематичних безперервних спостережень за мінливістю рівня води в лимані на водпосту «Одеса-Куяльник», а також епізодичних спостережень за рівнем, температурою та солоністю води в лимані, виконаних фахівцями ОДЕКУ при проведенні моніторингу протягом 2015 р.

Окремо слід зупинитись на використанні при моделюванні даних спостережень за мінливістю кількості атмосферних опадів, які випадають на поверхню лиману. Спочатку були використані наявні дані спостережень на ГМС «Одеса-ГМО». Однак, результати числових експеримен-

тів з моделлю, а також порівняльний аналіз даних спостережень за атмосферними опадами на інших, довколишніх до Куяльницького лиману, гідрометеостанціях «Любашівка» та «Одеса-порт» показали (рис. 8-9), що через мілководність лиману і велику площу його водної поверхні, для правильного відтворення при моделюванні річного ходу рівня води в лимані принципово важливим є точне завдання інтенсивності злив, які випадають на поверхню лиману.

Як видно з рис. 8, інтенсивність злив за даними різних гідрометеостанцій характеризується значною просторовою мінливістю.

Використання при моделюванні даних щодо атмосферних опадів, виміряних на ГМС «Одеса-ГМО», «Любашівка» та «Одеса-порт», призвело до стрибкоподібного підвищення рівня води після злив на початку квітня та на початку липня 2015 р. (рис. 9), що не узгоджувалось з даними спостережень за рівнем води у лимані. У подальшому ці похибки, як систематичні, зберігались протягом усього періоду моделювання. Найменші похибки відзначались при використанні даних спостережень за опадами на найближчий до лиману ГМС «Одеса-порт». Тому у подальшому були отримані і використані при моделюванні дані спостережень за атмосферними опадами на метеопосту «Одеса-Куяльник», розташованому у м. Одеса, пров. Лиманний (рис. 6з), що дозволило отримати добре узгодження внутрішньорічної мінливості спостережених та розрахованих значень рівня води у лимані (рис. 10а).

Результати модельних розрахунків мінливості температури води в лимані, яка впливає на інтенсивність випаровування з його водної поверхні і, таким чином, зумовлює зменшення рівня води, також добре узгоджуються з даними спостережень (рис. 10б). Річна мінливість місячних шарів випаровування, розрахована при моделюванні, наведена на рис. 10в.

З більшими похибками, ніж температура води, відтворюється моделлю просторово-часова мінливість солоності води в лимані (рис. 11), особливо у його північній частині (рис. 11в).

З огляду на значну мілководність північної частини лиману при відмітках рівня води, які спостерігались у 2015 р., заниження розрахованих для неї значень солоності води може бути наслідком впливу декількох чинників: завищення припливу до неї прісних вод від водотоків, неврахування в моделі розчинення частки накопичених в лимані сольових відкладень, похибок при завданні глибин в цій частині лиману.

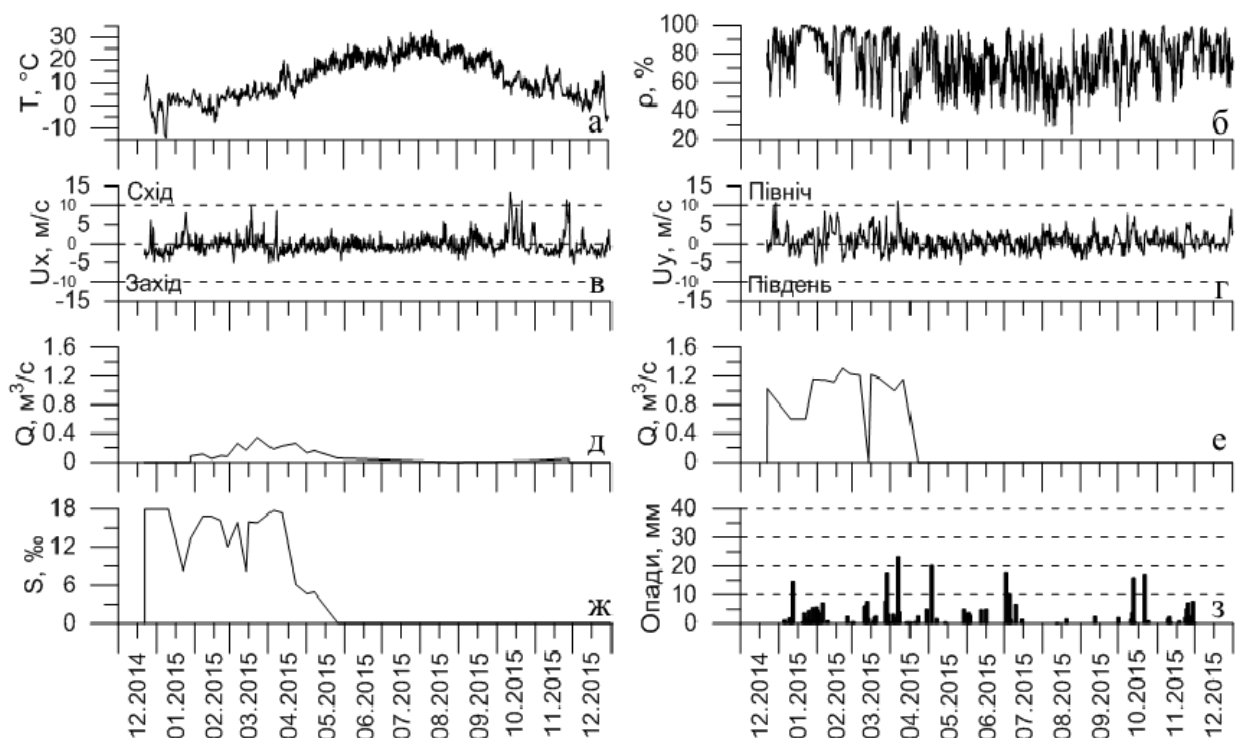


Рис. 6 – Вихідні дані, що використовувались під час валідації моделі за гідрометеорологічних умов 2015 р.: часова мінливість температури, °С (а), вологості повітря, % (б); компоненти вектору швидкості вітру, м/с, у напрямках «схід-захід» (в) та «північ-південь» (г) (за даними спостережень на ГМС «Одеса-ГМО»); сумарні витрати річок, балок, лотків з ВНС № 5 та пересипу у лиман, м³/с (д); витрати, м³/с, (е) та солоність, %, (ж) морської води у водопропуску «лиман-море»; добовий шар атмосферних опадів, мм, виміряних на метеопосту «Одеса-Куяльник» (з)

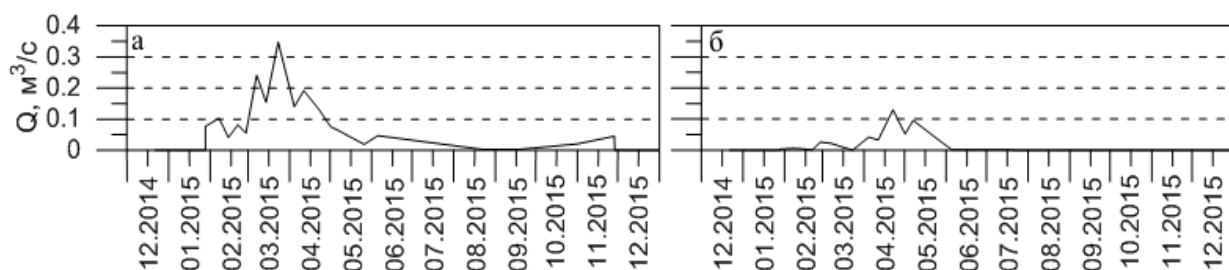


Рис. 7 – Мінливість сумарних витрат води, м³/с, по тимчасовим водотокам (р. Довбока, р. Кубанка, б. Гільдендорфська, б. Корсунцівська, лотки з ВНС №5 та зі ставків пересипу) (а) та витрат води р. В. Куяльник (б) у 2015 р.

Уявлення про просторову мінливість відміток рівня води в лимані, за вітрів різних напрямків і швидкості, та відтворення моделлю змін площі водного дзеркала лиману, при різних відмітках середнього рівня води, дають результати моделювання, представлені на рис. 12.

На рис. 13 наведені зведені ряди часової мінливості рівня води в точках біля північної та південної меж водної поверхні лиману у 2015 р. Вони свідчать про те, що при штормових вітрах, повздовжніх (північних, південних) по відношенню до акваторії лиману напрямків, різниця відміток води в північній та південній його частинах може досягати 0,35-0,4 м.

Отримані результати моделювання свідчать про можливість використання гідродинамічної

моделі Delft3D-FLOW для діагнозу та прогнозу, дослідження особливостей просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману під впливом природних та антропогенних чинників, які формують його гідрологічний режим.

5. ВИСНОВКИ

Для вирішення задачі діагнозу та прогнозу просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик лиману (рівня, солоності, температури води), які обумовлюють хімічні та біологічні процеси у ньому, і, таким чином, впливають на властивості рапи та лікувальних грязей, була застосована нестационарна тривимірна чи-

сельна гідротермодинамічна модель Delft3D-FLOW. Наведені в роботі результати адаптації до умов Куяльницького лиману та верифікації цієї моделі свідчать про можливість її використання для дослідження особливостей і прогнозування просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману під впливом природних та антропогенних чинників, які формують його гідрологічний режим.

Чисельні експерименти з моделлю показали, що через морфологічні особливості ложа лиману та його мілководність, правильно відтворити

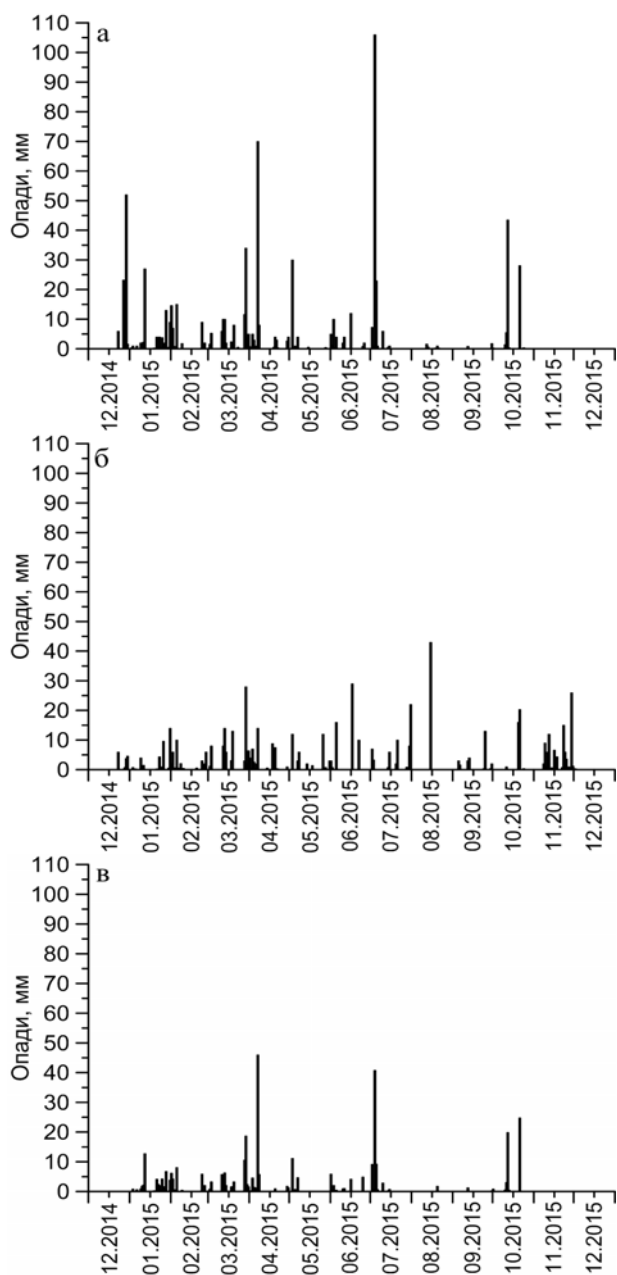
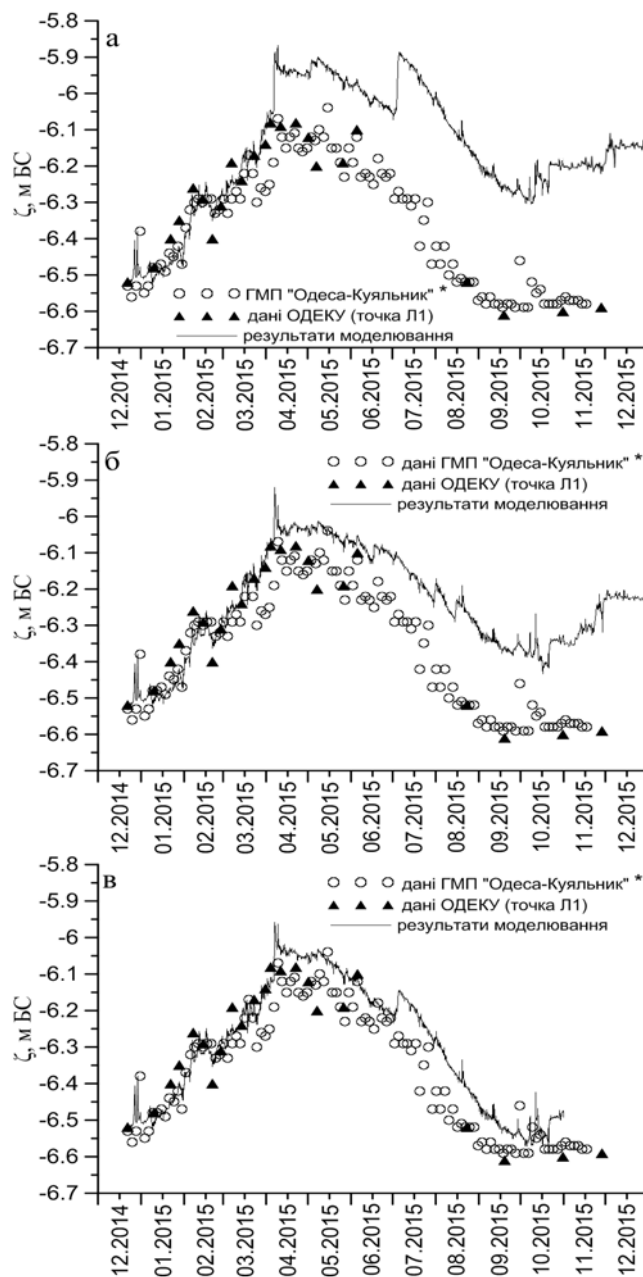


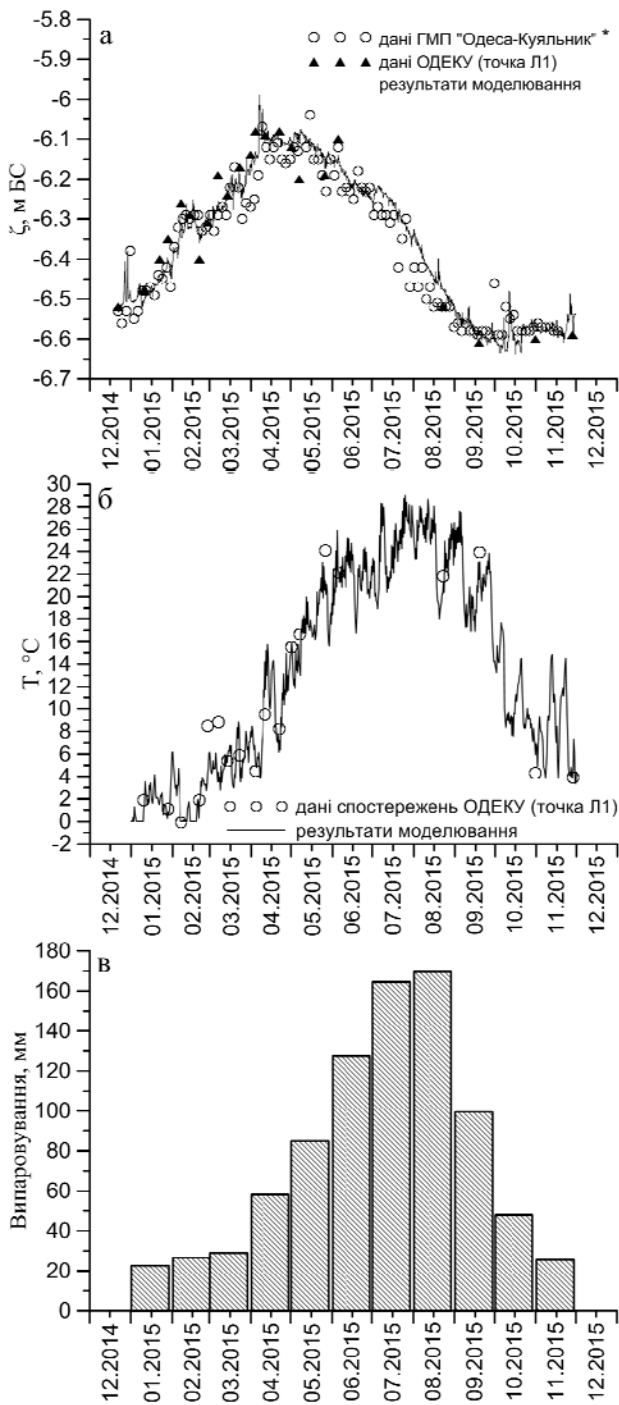
Рис. 8 – Часова мінливість атмосферних опадів, мм, у 2014-2015 рр. за даними різних гідрометеостанцій: а – «Одеса-ГМО»; б – «Любашівка»; в – «Одеса-порт»

мінливість гідрологічних умов в ньому можливо лише за умови врахування не тільки стоку р. В.Куяльник, але й надходження прісних вод від інших тимчасових водотоків ярво-балочної системи лиману, зливових та стічних вод через лоткові водостоки. Виключно важливу роль у формуванні внутрішньорічної мінливості рівня та солоності води в лимані відіграють зливові опади.



* дані проріджені через кожні 3 значення для зручності читання

Рис. 9 – Часова мінливість рівня води, м БС, в Куяльницькому лимані у 2015 р. за даними натурних спостережень (точки) та отримана в результаті моделювання (криві), з використанням даних спостережень за атмосферними опадами на гідрометеостанціях «Одеса-ГМО» (а), «Любашівка» (б), «Одеса-порт» (в)



* дані проріджені через кожні 3 значення для зручності читання

Рис. 10 – Часова мінливість рівня, м БС, (а) та температури води, °С, (б) в Куяльницькому лимані протягом 2015 р.: за даними натурних спостережень (точки) та отримана при моделюванні (криві) з використанням даних спостережень за атмосферними опадами на метеопосту «Одеса-Куяльник». Місячні шари випаровування з водної поверхні лиману (точка Л1) (в), розраховані за моделлю

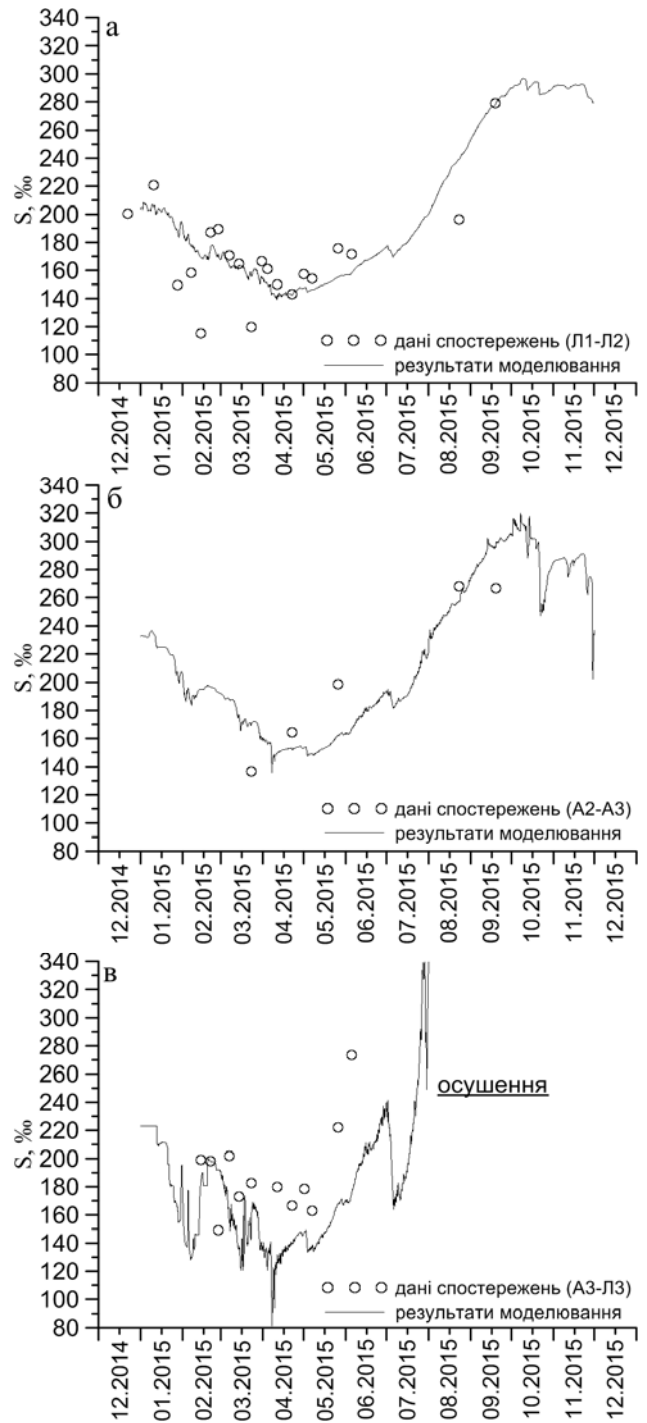


Рис. 11 – Часова мінливість солоності води в Куяльницькому лимані протягом 2015 р. за даними натурних спостережень (точки) та отримана в результаті моделювання (криві) в різних частинах акваторії лиману: а – середні значення між реперними точками Л1 та Л2; б – середні значення між реперними точками А2 та А3; в – середні значення між реперними точками А3 та Л3

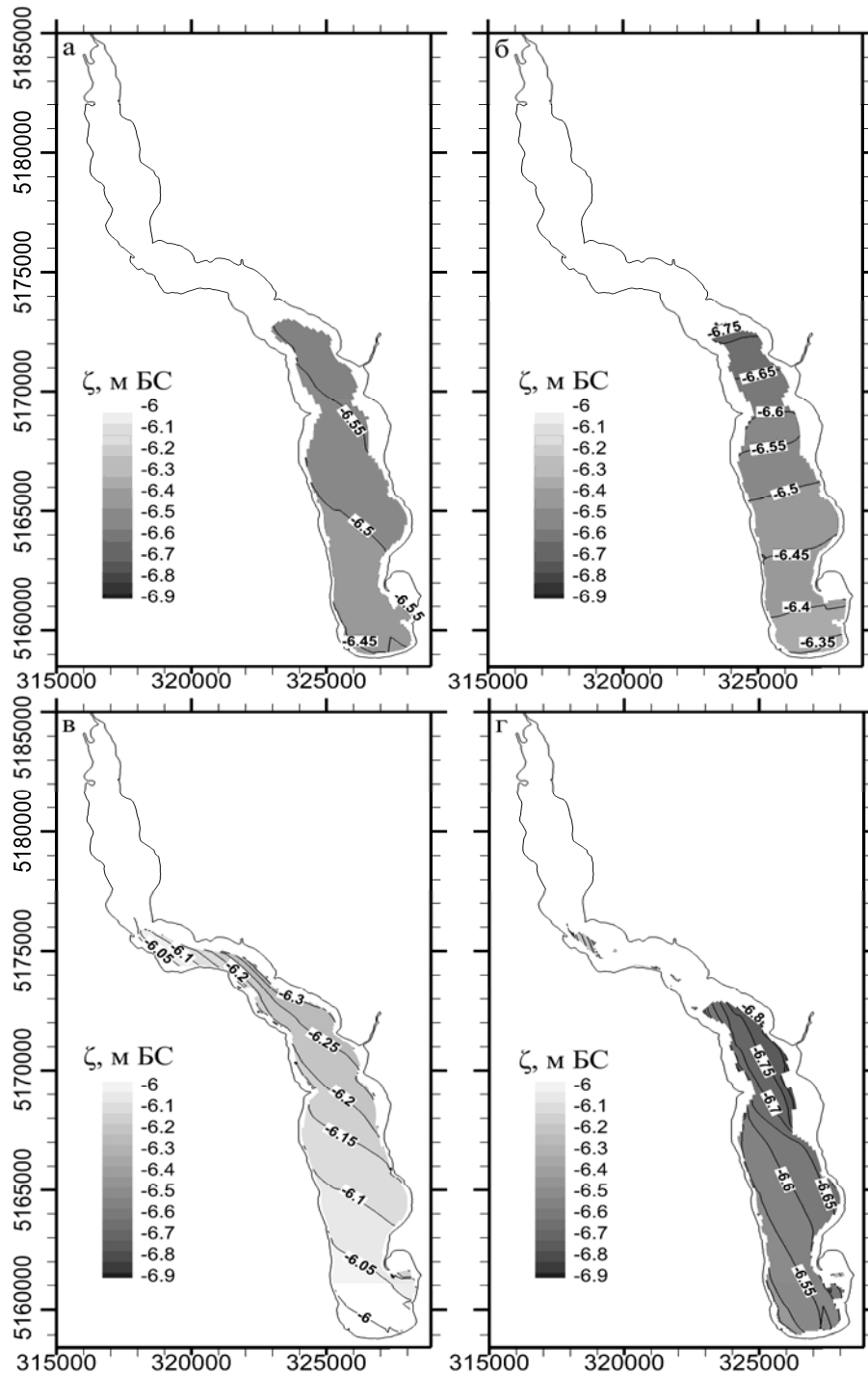


Рис. 12 – Отримана при моделюванні просторова мінливість відміток рівня води в лимані, м БС, та меж його водного дзеркала у різні моменти часу: а – 27.12.2014 р. 12:00; б – 29.12.2014 р. 15:00; в – 07.04.2015 р. 03:00; г – 12.10.2015 р. 00:00

Точність завдання їх інтенсивності та повторюваності при імітаційному моделюванні визначає систематичну похибку діагностичних та прогностичних розрахунків. За результатами моделювання також встановлено, що при штормових вітрах повздовжніх по відношенню до акваторії лиману напрямків, різниця відміток рівня води в північній та південній його частинах може досягати 0,35-0,4 м. Це необхідно враховувати при

аналізі даних спостережень за рівнем води в лимані, виконаних в окремих точках його акваторії.

У подальшому модель планується використати для визначення особливостей просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману за типових для сучасного кліматичного періоду умов, при реалізації різних

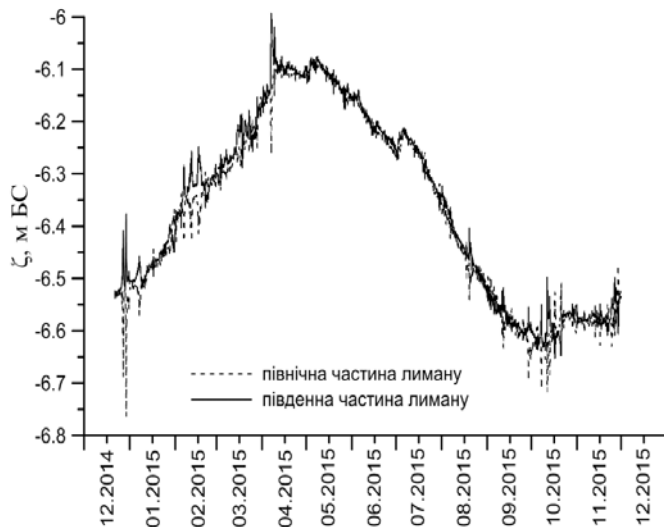


Рис. 13 - Часова мінливість відміток рівня води, м БС, біля північної та південної меж водної поверхні акваторії Куяльницького лиману

сценаріїв його водного менеджменту, зокрема, різних режимах поповнення лиману морською водою з Одеської затоки, збільшенні стоку р. В.Куяльник шляхом нормування водогосподарської діяльності в її басейні, розчищення русла, зменшення кількості штучних водойм на водозборі річки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Delft3D 4.01 Suite [Електронний ресурс]: (вихідний код та графічний інтерфейс користувача програмного пакету Delft3D) / Deltares systems // Спілька користувачів відкритого програмного забезпечення Delft3D. – 2016. – Режим доступу: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/>. – Назва з екрану (17.02.2016 р).
2. Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments [Електронний ресурс]: (посібник користувача гідродинамічної моделі Delft3D-FLOW) / Deltares systems // Delft, The Netherlands. – 2016. Режим доступу: http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf/. – Назва з екрану (17.02.2016 р).
3. Розенгурт М.Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов Одесских лиманов: монография. – Киев: Наукова думка, 1974. – 224 с.
4. Тимченко В.М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья: монография. – К.: Наук. думка, 1990. – 240 с.
5. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья: монография / Под ред. Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко // Гопченко Е.Д. Оценка многолетних изменений составляющих водного баланса Куяльницького лимана и рекомендации по сохранению его природных ресурсов / Е.Д. Гопченко, О.Н. Гриб. – Одесса: ТЭС, 2011. – С. 149-168.
6. Капочкин Б.Б. К вопросу о состоянии Куяльницького лимана / Б.Б. Капочкин, Ж.В. Исакова, М.И. Исаков // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей.

- 2011. – №1 (2). – С. 118-136.
7. Адобовский В.В. Особенности современного гидролого-гидрохимического режима Куяльницького лимана и прогнозная оценка его составляющих в условиях возможного пополнения водоема морскими и пресными водами / В.В. Адобовский, Ю.И. Богатова // Український гідрометеорологічний журнал. – 2013. – № 13 – С. 127-137.
8. Эннан А.А. Причины и последствия деградации Куяльницького лимана (Северо-западное Причерноморье, Украина) / А.А. Эннан, И.И. Шихалеев, Г.Н. Шихалеева, В.В. Адобовский, А.Н. Кирушкина // Вісник ОНУ. Хімія. – 2014. – том 19, вип. 3(51). – С. 60-69.
9. Оцінка можливого альтернативного наповнення Куяльницького лиману водами Чорного моря, річки Дністер й інших лиманів і водних об'єктів: Звіт з НДР заключний (наук. кер.: Ю.С. Тучковенко), ДР № 0112U007605, Од. держ. еколог. ун-т. – Одеса, 2012. – С. 149-157 с.
10. Ivanov V.A., Tuchkovenko Yu.S. *Applied mathematical water-quality modeling of shelf marine ecosystems*. Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute-Odessa State Environmental University, 2008, 295 p.
11. 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.
12. 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.
13. Gill Adrian E. *Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series*, Academic Press, 1982, vol.30. 680 p.
14. Lane A. The heat balance of the North Sea. *Tech. Rep. 8*, Proudman Oceanographic Laboratory, 1989, pp. 243, 254.
15. Wu Jin. The sea surface is aerodynamically rough even under light winds. *Boundary layer Meteorology*, 1994, no. 69, pp.149-58.
16. Chow Ven Te. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 1959, 680 p.
17. Окубо А. Эмпирическая зависимость коэффициента горизонтальной диффузии в океане от масштаба явления / А. Окубо, Р.В. Озмидов // ФАО, 1970, т.VI, №5. – С. 534-536.
18. Simon A.J., Kent E.C., Taylor P.K. *The Southampton Oceanography Centre (SOC) Ocean-Atmosphere Heat, Momentum and Freshwater Flux Atlas*. Tech. rept. Southampton Oceanography Centre, 1999, 59 p.
19. Гриб О.М. Историчні відомості про штучне поповнення Куяльницького лиману водами інших водойм // Матер. Всеукр. наук.-практ. конф. «Лимани північно-західного Причерномор'я: сучасний гідроекологічний стан; проблеми водного та екологічного менеджменту, рекомендації щодо їх вирішення». – Одеса: ОДЕКУ, 2014 р. – С. 61-63.

REFERENCES

1. Deltares, 2016. *Delft3D 4.01 Suite*. Available through: Delft3D Open Source Community <<http://oss.deltares.nl/web/delft3d/>> [Accessed 17 February 2016].
2. 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].
- Rozengurt M.Sh. *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktsii prirodnykh resursov Odesskikh limanov* [Hydrology and Prospects for Natural Resources Rearrangement in the Lagoons of the Odessa Region]. Kiev: Naukova dumka, 1974, 224 pp. (in Russian).
 - 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]. Kyiv: Naukova Dumka, Institute of Hydrobiology of NASU, 1990, 240 p. (in Russian).
 - Gopchenko E.D., Gryb O.M. Otsenka mnogoletnikh izmeneniy sostavlyayushchikh vodnogo balansu Kuyal'nitskogo limana i rekomendatsii po sokhraneniyu ego prirodnykh resursov [Assessment of the annually variations in the components of the water balance of the Kuyalnytskyi Lyman lagoon and recommendations for its natural resources conservation] *Aktual'nye problemy limanov severo-zapadnogo Pri-chernomor'ya* [Topical problems of lagoons of the North-Western Black Sea Region]. (Eds: Tuchkovenko Yu.S., Gopchenko E.D.). Odessa: TES, OSENU, 2011, pp. 149-168.
 - Kapochkin B.B., Isakova J.V., Isakov M.I. K voprosu o sostoyanii Kuyal'nitskogo limana [On the matter of the Kuyalnytskyi Lyman lagoon condition] *Vestnik Gidromettsentra Chernogo i Azovskogo morey – Bulletin of Hydrometeorological Center of the Black and Azov Seas*, 2011, no. 1 (2), pp. 118-136 (in Russian).
 - Adobovskiy V.V., Bogatova Yu.I. Osobennosti sovremen-nogo gidrologo-gidrokhimicheskogo rezhima Kuyal'nit-skogo limana i prognoznaya otsenka ego sostavlyayushchikh v usloviyakh voz-mozhnogo popolneniya vodoema morskimi i presnymi vodami [Aspects of the modern hydrological and hydrochemical regime of the Kuyalnytskyi Liman lagoon and prognostic assessment of its components under conditions of possible reservoir replenishment with sea and free-salinated waters]. *Ukr. gidrometeorol. ž. – Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 2013, no. 13, pp. 127-137 (in Russian).
 - Ennan A.A., Shykhalyeyev I.I., Shykhalyeyeva G. N., Adobovsky V.V., Kiryushkina A. N. Prichiny i posledstviya degradatsii Kuyal'nitskogo limana (Cevero-zapadnoe Prichernomor'e, Ukraina) [Effects of Kuyalnik estuary degradation (Northwest Black Sea Region, Ukraine)]. *Visnyk Odes'kogo nacional'nogo universy'tetu. Khimiya. – Odesa National University Herald. Chemistry*, 2014. vol. 19, no 3(51), pp. 60-69 (in Russian).
 - Tuchkovenko Yu.S. (scient. chief). *Otsinka mozhlivoho alternatyvnoho napovnennia Kuyalnytskoho lymanu vodom Chornoho moria, richky Dnister y inshykh lymaniv i vodnykh ob'ektiv* [Assessment of possible alternate filling of the Kuyalnytskyi Lyman lagoon with waters of the Black Sea, the Dnister River and another lagoons and water bodies]. Final Report, No. 0112U007605, Odessa, OSENU, 2012, pp. 149-157 (in Ukrainian).
 - Ivanov V.A., Tuchkovenko Yu.S. *Applied mathematical water-quality modeling of shelf marine ecosystems*. Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute-Odessa State Environmental University, 2008, 295 p.
 - 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.
 - 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.
 - Gill Adrian E. *Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series*, Academic Press, 1982, vol.30. 680 p.
 - Lane A. The heat balance of the North Sea. *Tech. Rep. 8*, Proudman Oceanographic Laboratory, 1989, pp. 243, 254.
 - Wu Jin. The sea surface is aerodynamically rough even under light winds. *Boundary layer Meteorology*, 1994, no. 69, pp.149-58.
 - Chow Ven Te. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 1959, 680 p.
 - Okubo A., Ozmidov R.V. Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion in the ocean on the scale of the phenomenon in question, *Oceanology*, 1970, No. 6, pp. 308-309.
 - Simon A.J., Kent E.C., Taylor P.K. *The Southampton Oceanography Centre (SOC) Ocean-Atmosphere Heat, Momentum and Freshwater Flux Atlas*. Tech. rept. Southampton Oceanography Centre, 1999, 59 p.
 - Hryb O.M. Istorychni vidomosti pro shtuchne popovnennia Kuyalnytskoho lymanu vodamy inshykh vodoim [Historical information about induced replenishment of the Kuyalnytskyi Lyman lagoon with waters of another reservoirs]. Mater. Vseukr. nauk.-prakt. konf. "Lymany pivnichno-zakhidnoho Prychornomor'ia: suchasnyi hidroekologichni stan; problemy vodnoho ta ekolohichnoho menedzhmentu, rekomendatsii shchodo yikh vyrishennia" [Proc. All-Ukr. Scientif.-Pract. Conf. "Lagoons of the North-Western Black Sea Region: modern hydroecological conditions; problems of water and environmental management, recommendations for their resolving"]. Odesa. OSENU, 2014. pp. 61-63 (in Ukrainian).

RESULTS OF THE NUMERICAL MODELLING OF INTRA-ANNUAL VARIABILITY OF CHARACTERISTICS OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE KUYALNIK LIMAN LAGOON

Yu.S. Tuchkovenko, Doctor of Geographical Sciences,
D.V. Kushnir

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

In order to solve the problems of diagnosis and forecast of spatial-temporal variability of hydrological characteristics of the Kuyalnik Liman (water level, salinity and temperature) which

cause chemical and biological processes occurring therein, and, therefore, affect the properties of brine and therapeutic mud, a non-stationary 3D numerical hydrothermodynamic model Delft3D-FLOW was applied.

The model can be applied for research of the features and forecasting of spatial-temporal variability of hydrological characteristics of the Kuyalnik Liman under the influence of natural and anthropogenic factors forming its hydrological regime. Such opportunity is also indicated by the results of adaptation of the model to the Kuyalnik Liman conditions and its validation that are specified in this work.

The important role of accounting of small streams flowing into the liman and accurate setting of intensity of storm rainfall during modelling is also shown. It is found that at the time of storm winds with longitudinal directions in relation to the liman's water surface, the difference of watermarks in its northern and southern parts may reach 0.35-0.4 m.

Keywords: the Kuyalnik Liman, hydrological regime, hydrodynamic modelling.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА КУЯЛЬНИЦКОГО ЛИМАНА

Ю.С. Тучковенко, д.геогр.н.,
Д.В. Кушнир

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

Для решения задачи диагноза и прогноза пространственно-временной изменчивости гидрологических характеристик Куяльницкого лимана (уровня, солёности, температуры воды), которые обуславливают химические и биологические процессы в нем, и, таким образом, влияют на свойства рапы и лечебных грязей, применена нестационарная трехмерная численная гидротермодинамическая модель Delft3D-FLOW. Приведенные в работе результаты адаптации к условиям Куяльницкого лимана и верификации модели свидетельствуют о возможности ее использования для исследования особенностей и прогнозирования пространственно-временной изменчивости гидрологических характеристик Куяльницкого лимана под влиянием природных и антропогенных факторов, формирующих его гидрологический режим. Показана важная роль учета при моделировании малых водотоков, которые впадают в лиман, и точного задания интенсивности ливневых атмосферных осадков. Определено, что при штормовых ветрах продольных по отношению к акватории лимана, разница отметок уровня воды в северной и южной его частях может достигать 0,35-0,4 м.

Ключевые слова: Куяльницкий лиман, гидрологический режим, гидродинамическое моделирование.

Дата першого подання.: 05.03.2016

Дата надходження остаточної версії : 10.05.2016

Дата публікації статті : 04.07.2016