

Сахненко О.І., к.г.н., Тучковенко Ю.С., д.г.н.
Одеський державний екологічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРО-ХВИЛЬОВОЇ ДИНАМІКИ ВОД ПРИБЕРЕЖНОЇ МОРСЬКОЇ АКВАТОРІЇ В РАЙОНІ ТИЛІГУЛЬСЬКОГО ЛИМАНУ

Виконано чисельне моделювання вітрового хвилювання та вітро-хвильових течій на прибережній акваторії, в межах якої знаходиться штучний канал, що з'єднує Тилігульський лиман з морем. Використано комплекс чисельних моделей, що об'єднує спектральну хвильову модель та чисельну гідродинамічну модель прибережних вітро-хвильових течій.

Ключові слова: північно-західна частина Чорного моря, північне узбережжя, вітро-хвильова динаміка вод, чисельне моделювання.

Вступ. Прибережна акваторія моря в районі Тилігульського лиману схильна до істотних змін, що позначається на характері її господарського використання та морфології. На природні процеси накладається антропогенний вплив, особливо помітний в зонах максимальної концентрації господарської діяльності, що призводить до великих змін в гідродинаміці.

Тилігульський лиман відділений від моря пересипом, в якому проритий штучний канал, з'єднуючий лиман з морем. Однак канал функціонує періодично, оскільки інтенсивно замивається піском з боку моря. На даний час, приймаючи до уваги тенденцію до зниження водних ресурсів р.Тилігул, забезпечення водооновлення Тилігульського лиману за рахунок водообміну з морем є найбільш реальним механізмом стабілізації та регулювання екологічного стану лиману [1]. На сьогодні проводяться інтенсивні проектно-пошукові роботи, спрямовані на запобігання пересихання лиману шляхом забезпечення ефективного функціонування штучного каналу. В зв'язку з необхідністю вирішення цих прикладних завдань потрібна детальна інформація про параметри вітрового хвилювання та вітро-хвильові течії на прибережній морській акваторії в районі розташування каналу. Питання аналізу динаміки вод прибережної морської акваторії вимагає детального вивчення, що і є **метою** даної роботи.

Методи дослідження. У разі, якщо індукованою хвилями циркуляцією вод в прибережній зоні не можна нехтувати, для опису динаміки вод вона повинна бути адекватно описана та врахована в гідродинамічній моделі. Тому при моделюванні вищевказаних процесів, включаючи нелінійні взаємодії між хвилями, використовувався комплекс математичних моделей [2]. Комплекс включає блок розрахунку вітрового хвилювання в якості спектральної моделі SWAN [3], заснованої на рішенні рівняння балансу хвильової енергії, та блок розрахунку вітро-хвильових течій у прибережній зоні моря [2, 4].

Просторові поля середньої висоти, довжини, періоду вітрових хвиль, розраховані з урахуванням трансформації та обвалення хвиль, використовуються як вхідні дані до гідродинамічного блоку. Гідродинамічний блок розроблений таким чином, що в ньому проводиться розрахунок хвильових радіаційних напруг, що визначають характер хвильової циркуляції на акваторії. Вітро-хвильова циркуляція вод в прибережній зоні моря описується осередненими за глибиною та періодом вітрових хвиль рівняннями Рейнольдса

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho h} (\tau_{wx} - \tau_{0x}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - f_0 V = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho h} (\tau_{wy} - \tau_{0y}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + f_0 U = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

де вісі x та y спрямовані, відповідно, у вздовжбереговому та поперечному напрямках; t - час; U та V - осереднені за глибиною компоненти вектора швидкості течії по осях x та y , відповідно; ξ - відхилення рівня вільної поверхні від незбуреного рівня; $h = h_0 + \xi$ - локальна глибина; h_0 - відстань від дна до деякої поверхні відліку, що характеризує незбурений рівень водойми; ρ - середня щільність води; f_0 - параметр Коріоліса; g - прискорення вільного падіння; τ_{wx} та τ_{wy} - компоненти тангенціальних напружень вітру на вільній поверхні; τ_{xy} , τ_{yx} - турбулентні напруги потоку; τ_{0x} і τ_{0y} - компоненти тангенціальних напружень потоку біля дна.

Потік імпульсу, що виникає при обваленні вітрових хвиль, враховують компоненти хвильових радіаційних напружень. Просторові та часові флуктуації хвильових радіаційних напружень створюють сили, які викликають хвильові течії. S_{xx} , S_{xy} , S_{yy} - компоненти хвильових радіаційних напружень, що визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \cos^2 \alpha + n - 1/2), \\ S_{xy} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \sin \alpha \cos \alpha), \\ S_{yy} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \sin^2 \alpha + n - 1/2), \end{aligned} \quad (4)$$

$$n = \frac{1}{2} + \frac{K_w h}{sh 2K_w h}, \quad K_w = \frac{2\pi}{\lambda},$$

λ - довжина вітрових хвиль; h_b , α - висота та кут підходу вітрових хвиль до берега, відповідно.

Кожна модель застосовувалася для вирішення свого приватного завдання, але, в цілому, ці моделі дозволяють досягти кінцевий результат – отримати поля вітро-хвильових течій, за рахунок того, що гідродинамічна модель використовує в якості вихідної інформації результати, отримані за допомогою моделі хвилювання.

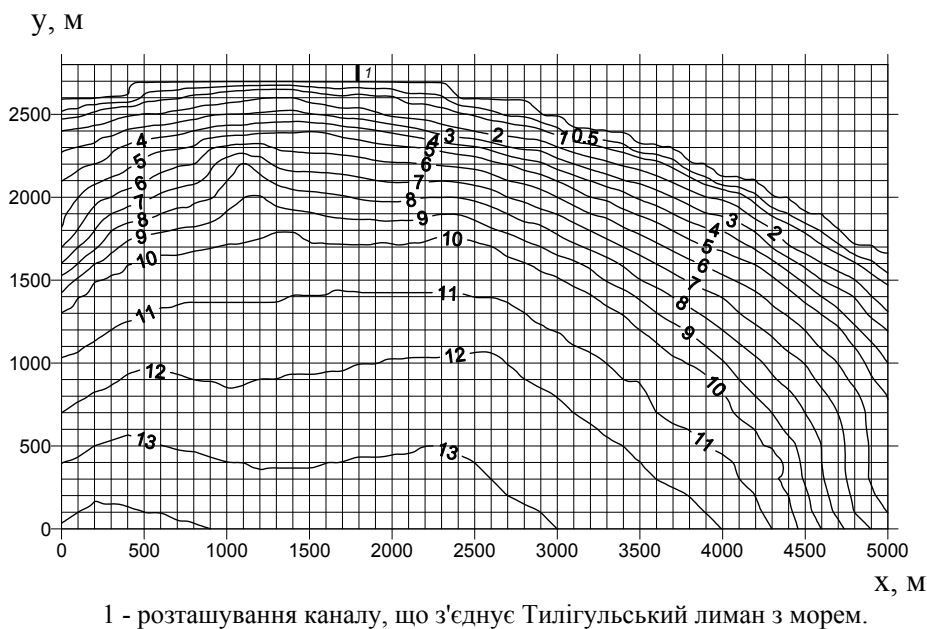
Розрахунок трансформації та обвалення вітрових хвиль проводився для прибережної акваторії Чорного моря в районі Тилігульського лиману за різних вітро-хвильових умов. Поле глибин акваторії розміром 5000×2800 м апроксимовано розрахунковою сіткою з просторовим кроком 100 м по осях x та y , спрямованих на схід і північ, відповідно (рис.1). Максимальні глибини на досліджуваній ділянці прибережної акваторії, відносно до нуля Балтійської системи, склали 14 м. Розташування каналу, що з'єднує Тилігульський лиман з морем та забезпечує його водообмін, в обраній системі координат знаходиться в точці $x = 1800$ м, $y = 2700$ м. Розрахунки трансформації параметрів хвиль проводилися для двох випадків: підходу

хвильових гребенів у напрямку, майже нормальному до берега під впливом південного вітру та під кутом до берега при південно-східному вітрі.

Вважалось, що хвилювання генерується вітром швидкістю 5, 8, 11 та 14 м/с південного та південно-східного напрямків. На відкритій морській границі розрахункової області задавалися середній період та висота значної хвилі. Середні характеристики хвилювання визначалися з емпіричних співвідношень, що зв'язують їх зі швидкістю вітру, довжиною розгону та глибиною моря [5]. Висота значної хвилі h_s визначалася зі співвідношення, що пов'язує її із середньою висотою хвилі \bar{h}_b [6]:

$$\bar{h}_b = 0.6 h_s$$

При південному вітрі швидкістю 11 м/с усталене хвилювання на південній морській границі розрахункової області характеризувалося наступними параметрами: висота значної хвилі - 2.6 м, середній хвильовий період - 5.7 с. На західній границі задавалися змінні параметри вітрових хвиль, що зменшуються в напрямку до берега від значень на південній границі.



1 - розташування каналу, що з'єднує Тилігульський лиман з морем.

Рис.1 - Просторовий розподіл глибин (м) на прибережній акваторії Чорного моря в районі Тилігульського лиману.

Хвильовий спектр визначався за параметризацією JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) [3] з дискретністю 4^0 по кутовій координаті. Для частотної координати використовувалася нерівномірна сітка з 25 вузлами. Мінімальна частота 0,01 Гц. Максимальне значення висоти хвилі в зоні обвалення визначалося співвідношенням $h_{\max} = \gamma h$, де $\gamma = 0.78$ - параметр обвалення.

Аналіз результатів моделювання. Результати моделювання трансформації та просторового розподілу зон обвалення вітрових хвиль на прибережній акваторії моря в районі Тилігульського лиману наведені на рисунках 2-4. Вітрові хвилі сприяють перемішуванню прибережних вод і зважуванню донних відкладень на мілководді, що, в кінцевому підсумку, підвищує транспортну здатність потоків зависі. Просторовий розподіл зон обвалення вітрових хвиль має важливе значення при описі ерозійно-аккумуляційних процесів, транспортуванні та перерозподілі наносів.

Розглянемо результати моделювання трансформації вітрових хвиль на прибережній акваторії моря в районі Тилігульського лиману при південному вітрі. По мірі розповсюдження хвиль від морської границі розрахункової області до ізобати 6-7 м їх висота змінюється несуттєво. Руйнування хвиль спостерігається в прибережній зоні, про що свідчить згущення у берега ізолій висот хвиль. При слабкому вітрі швидкістю 5 м/с південного напрямку висоти значних хвиль на прибережній акваторії Тилігульського лиману не перевищують 0.65 м, і складають 1.3-1.5 м на більшій частині акваторії при вітрі швидкістю 8 м/с. При штормових вітрах південного напрямку швидкістю 14 м/с висоти значних хвиль досягають значення 2.4 м.

На рис. 4,а наведено отримане за модельним розрахунками поле висот значних хвиль, що поширювалися під кутом до берега під дією південно-східного вітру.

По мірі поширення по мілководній прибережній акваторії моря в районі Тилігульського лиману фронт хвилі розгортається і прагне зайняти паралельне береговій смузі положення. Тим самим виявляються ефекти рефракції вітрових хвиль на мілководді, зумовлені неоднорідністю глибин.

При вітрі швидкістю 8 м/с висоти значних хвиль не перевищують 1.5 м. При штормовому південно-східному вітрі швидкістю 14 м/с хвилі досягають найбільшого розвитку в південній частині акваторії. Висоти хвиль в прибережній смузі становлять близько 1.0 м, на південній границі розрахункової області - до 3.1 м.

При південно-східному вітрі східна частина узбережжя є підвітряною, тому висоти хвиль тут менші, ніж у західній частині акваторії.

Середній по спектру період хвиль на розглянутій акваторії змінюється несуттєво (рис. 2-4,б). При вітрі швидкістю 5 м/с період вітрових хвиль практично не змінюється по мірі поширення хвиль до берега, залишаючись рівним близько 3 с. При південному вітрі швидкістю 11 м/с середній період хвиль зменшується від морської границі до берега та становить 5-6 с.

Причиною зміни середнього періоду хвиль в розрахунках є нелінійні взаємодії між хвилями, які враховуються при моделюванні.

При посиленні південного вітру до 14 м/с очікується зростання середніх за спектром періодів хвиль у досліджуваній акваторії. По мірі поширення до берега середній за спектром період зменшується від 7 с до 3 с.

В умовах південно-східного вітру швидкістю 14 м/с максимальні значення періоду мають місце у північно-західного навітряного берега. На південній границі розрахункової області середній за спектром період хвиль становить 6.5 с.

При південно-східному вітрі швидкістю 8 м/с середній період складає 3.0- 4.8 с.

Середня довжина хвиль зменшується в міру наближення хвильових гребенів до берега від 12 м до 4 м при слабкому південному вітрі (5 м/с) та з 40 - 45 м до 10 м – при штормовому південному вітрі (11 - 14 м/с). При південно - східному вітрі силою 8 м/с до північно-західних берегів підходять хвилі середньою довжиною до 16 м.

По мірі поширення хвиль над мілководним дном орбітальний рух частинок води сягає дна, внаслідок чого відбувається скаламучення матеріалу, що його складає. Фактором, що визначає втрати хвильової енергії за рахунок тертя о дно, є орбітальна швидкість хвильового руху поблизу дна. Орбітальна швидкість хвильового руху поблизу дна є також показником інтенсивності зважування донного матеріалу хвилями. Розглянемо орбітальну швидкість хвильового руху у дна, яка дозволяє судити про турбулентні процеси скаламучення донного матеріалу на прибережній акваторії моря в районі Тилігульського лиману. Просторовий розподіл орбітальної швидкості хвильового руху у дна наведений на рис. 2-4,в. У просторовому розподілі орбітальної швидкості хвильового руху простежується зона інтенсифікації, орієнтована вздовж

берегової смуги. Максимальні значення орбітальної швидкості біля берега складають 0.65-0.7 м/с при південному і південно-східному вітрах в районі ізобат 2 та 3 м.

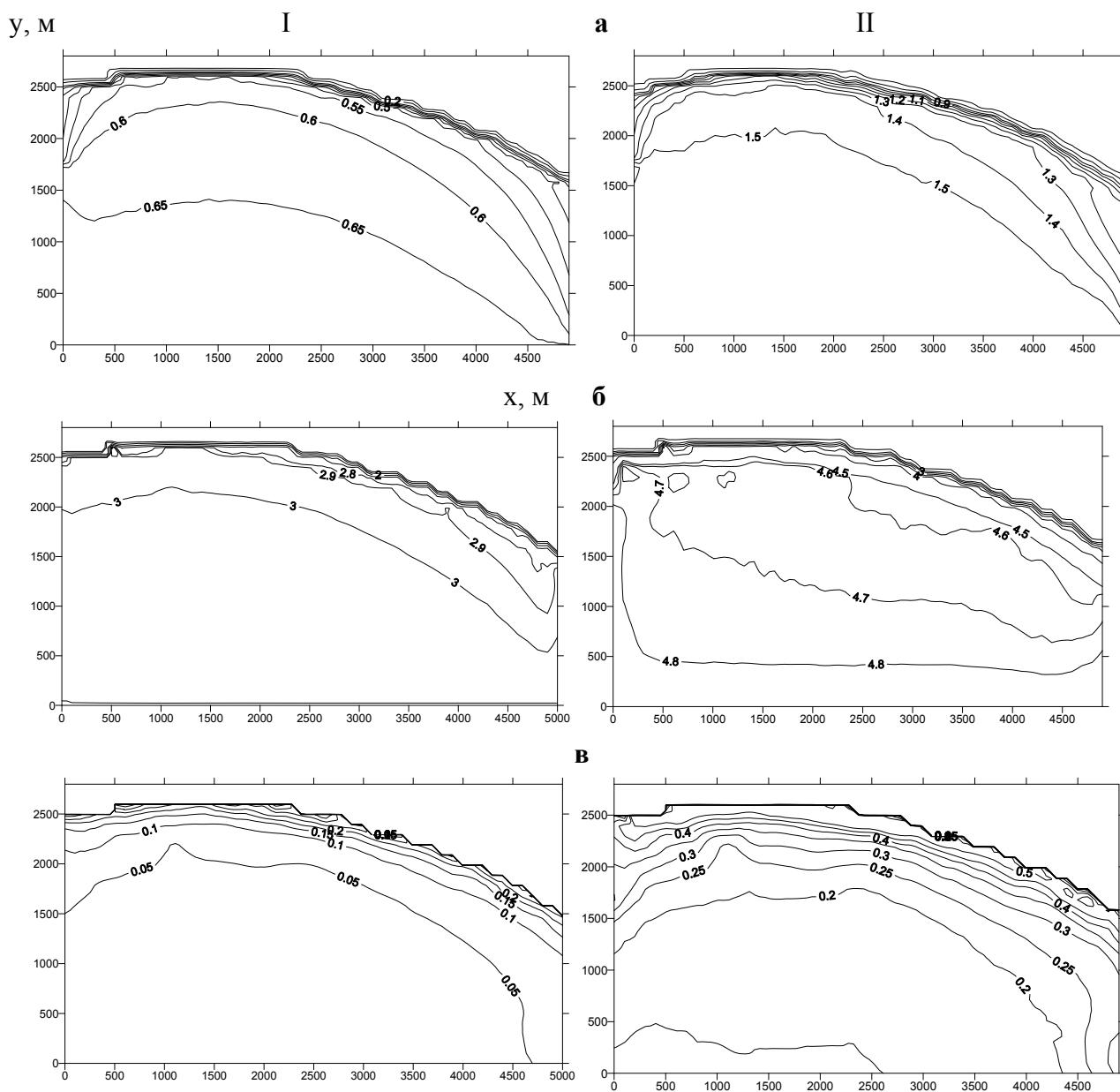


Рис. 2 - Просторовий розподіл висот (а) значних хвиль, м, середніх періодів хвиль, в секундах (б), та орбітальної швидкості хвильового руху біля дна (в), в м/с, на прибережній акваторії моря в районі Тилігульського лиману при південному вітрі швидкістю 5 м/с (I) і 8 м/с (II).

При штормовому південному вітрі швидкістю 14 м/с орбітальна швидкість збільшується від морської границі розрахункової області в напрямку до берега.

У вузькій прибережній смузі максимальні значення досягають 0.7 м/с в східній частині акваторії та 0.60-0.65 м/с - у західній частині. Поблизу каналу, що з'єднує Тилігульський лиман з морем, орбітальна швидкість різко падає до 0.15-0.05 м/с з руйнуванням хвиль.

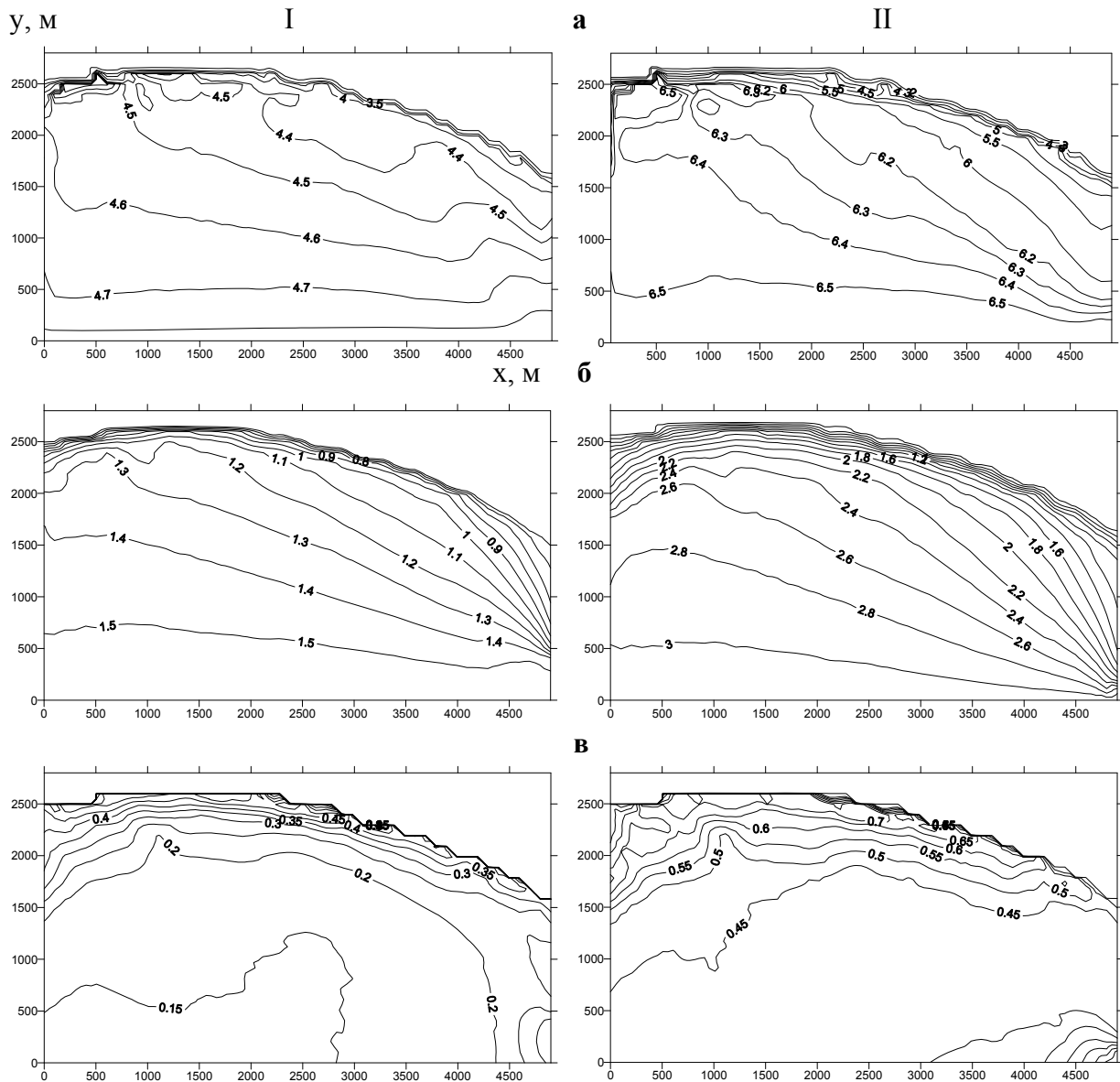


Рис.4 - Просторовий розподіл висот (а) значних хвиль, м, середніх періодів хвиль (б), в секундах, та орбитальної швидкості хвильового руху біля дна (в), в м/с, на прибережній акваторії моря в районі Тилігульського лиману при південно-східному вітрі швидкістю 8 м/с (I) і 14 м/с (II).

При південно-східному вітрі орбитальні швидкості хвильового руху у дна не перевищують значень 0.7 м/с – при швидкості вітру 14 м/с і складають 0.15-0.45 м/с – при вітрі швидкістю 8 м/с.

Відзначається поступове збільшення орбитальної швидкості у дна в міру просування вітрових хвиль до берега. Її величина поблизу дна залежить від стадії розвитку хвилювання та глибини місця.

Вітро-хвильові течії на прибережній акваторії Чорного моря в районі Тилігульського лиману. При слабкому південному вітрі швидкістю 5 м/с (рис. 5,а) максимальні швидкості течій відзначаються у західних берегів у східній частині досліджуваної ділянки прибережної акваторії. Хвилі підходять до нього під кутом, тому тут формується вздовжбереговий вітро-хвильовий потік зі швидкостями

0.02-0.10 м/с. Течії спрямовані на захід. На південній ділянці узбережжя, до якої хвилі підходять по нормалі, течії слабкі і спрямовані як до берега так і у бік моря.

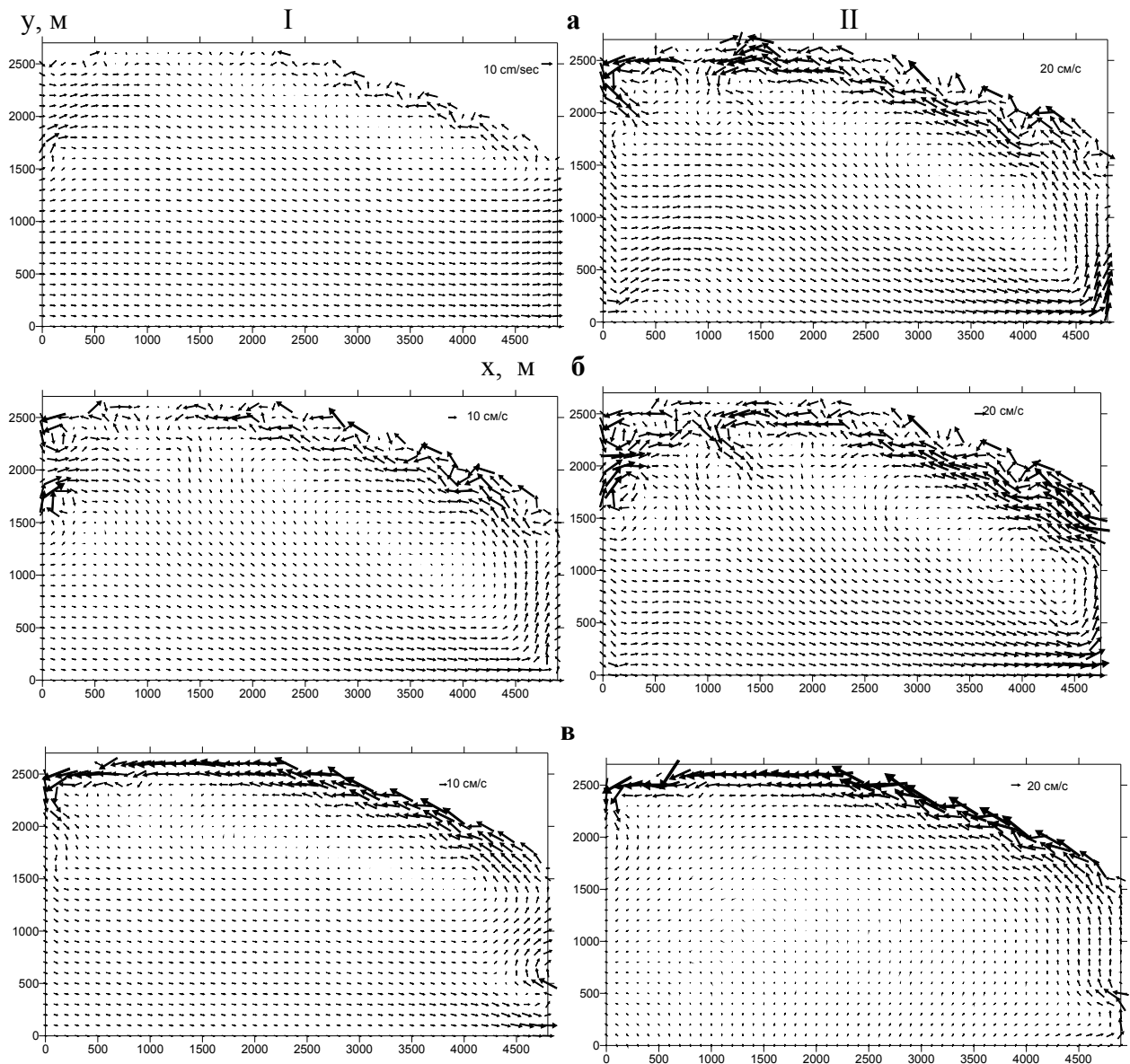


Рис. 5 - Поля векторів вітро-хвильових течій на прибережній акваторії Тилігульського лиману при південному вітрі 5 м/с (I.a) та 8 м/с (I.б), південно-східному вітрі 8 м/с (I.в), південному вітрі швидкістю 11 м/с (II.a) та 14 м/с (II.б), південно-східному вітрі швидкістю 14 м/с (II.б).

При південному помірному та штормовому вітрах вздовжбереговий потік, спрямований на захід, посилюється та збільшується його ширина. Максимальні швидкості течій у прибережній смузі мають місце у східній частині прибережної акваторії. З посиленням вітру максимумами швидкостей течій зміщуються у бік моря на відстань 100-300 м від берегової смуги, де досягають при вітрі швидкістю 8 м/с 0.15-0.20 м/с (рис. 5.I.б), при штормових вітрах – до 0.25-0.30 м/с (рис. 5.II.a-в).

При посиленні південного вітру в розрахунках фіксується формування струменевої течії. Вузька спрямована струміль прориває водну товщу в напрямку від берега, західніше каналу, що з'єднує Тилігульський лиман з морем. Струменева течія зі

швидкостями до 0.2-0.3 м/с починає формуватися вже при вітрі силою 11 м/с і найбільш чітко проявляється при штормовому вітрі швидкістю 14 м/с (рис.5, П,а,б). Формування тут струменевої течії пояснюється нагіном води до берега при нормальному підході хвиль в умовах південного вітру.

У самої берегової мілини також простежується збільшення швидкостей течії, але вже за рахунок обвалення вітрових хвиль. Інтенсивна циркуляція вод на прибережній акваторії в районі берегової смуги обумовлена вивільненням енергії вітрових хвиль при їх руйнуванні по мірі підходу до берега. Течії тут виникають як результат процесів дисипації енергії і втрати імпульсу в хвилях. Розраховані з урахуванням хвильової складової, швидкості вітро-хвильових течій досягають біля берега досить великих значень, більших, ніж на решті акваторії, місцями біля берегової мілини - до 0.5-0.6 м/с при штормовому вітрі.

При південно-східному вітрі формуються чітко виражені течії вздовж берегової смуги. Течія спрямована на захід, біля входу до каналу, що з'єднує Тилігульський лиман з морем, її швидкість складає 0.15-0.20 м/с при вітрі 8 м/с. У західній частині узбережжя швидкості течії складають до 0.3 м/с. При поширенні хвиль під кутом до узбережжя відзначається збільшення вздовжберегової складової швидкості течії в порівнянні з ситуацією, яка складається в умовах південного вітру. Основний потік води в прибережній акваторії Чорного моря в районі Тилігульського лиману спрямований з південного сходу і сходу на північний захід, захід.

Висновки. Проаналізовано особливості трансформації параметрів вітрового хвилювання на прибережній акваторії моря в районі Тилігульського лиману в умовах, коли на їх поширення впливає мілководне дно. Виконано моделювання вітрового хвилювання при різних швидкостях вітру (5, 8, 11, 14 м/с) південного і південно-східного напрямків з використанням спектральної моделі. В результаті адаптації комплексу моделей вітрового хвилювання і вітро-хвильової циркуляції вод до умов морської прибережної акваторії в районі Тилігульського лиману визначені особливості хвильової динаміки і вітро-хвильових течій при південному і південно-східному вітрах. Поля хвилювання в прибережній зоні характеризуються значною просторовою неоднорідністю, зумовленою впливом рельєфу дна, ефектами рефракції.

Зі збільшенням швидкості південного вітру до 11-14 м/с до берега підходять значні хвилі висотою до 2.4 м, у напрямку до берега вони швидко руйнуються.

При слабкому вітрі 5 м/с середній період вітрових хвиль практично не змінюється по мірі підходу хвиль до берега, залишаючись рівним близько 3 с.

Оскільки північно-західний берег навітряний, то при південно-східному вітрі висоти тут більші, ніж на суміжних ділянках узбережжя. При південно - східному вітрі швидкістю 14 м/с середній період хвиль становить 5-6.5 с. Максимальні значення періоду згідно розрахунку спостерігаються у північно-західного навітряного берега.

При південно-східному вітрі швидкістю 8 м/с до північно-західних берегів підходять хвилі середньою довжиною до 16 м.

У просторовому розподілі орбітальної швидкості хвильового руху простежується зона інтенсифікації, орієнтована уздовж берегової смуги.

При південному і південно-східному вітрах максимальні значення орбітальної швидкості хвильових рухів біля дна складають 0.65-0.7 м/с в районі ізобат 2 та 3 м.

З посиленням вітру максимумами швидкості течій зміщуються у бік моря на відстань 100-300 м від берегової смуги, де сягають при вітрі 8 м/с 0.15-0.20 м/с, при штормових вітрах - до 0.25-0.30 м/с.

Основний потік води в прибережній частині акваторії Чорного моря в районі Тилігульського лиману при південному і південно - східному вітрах спрямований з південного сходу і сходу на північний захід і захід.

При поширенні хвиль під кутом до узбережжя відзначається збільшення вздовжберегової складової швидкості течії в порівнянні з ситуацією, яка формується в умовах майже нормального підходу хвиль при південному вітрі.

У берегової обмілини простежується збільшення швидкості течій за рахунок обвалення вітрових хвиль. При посиленні південного вітру до 11-14 м/с згідно розрахункам зафіксовано формування струменевої течії. Вузька спрямована струмись прориває водну товщу в напрямку від берега, західніше каналу, що з'єднує Тилігульський лиман з морем.

Список літератури

1. *Адобовский В.В.* Современные процессы высыхания и осолонения лиманов с ограниченным водообменом // *Екологічні проблеми Чорного моря.* - Одеса.- 2002.- С. 3-8.
2. *Тучковенко Ю.С., Сахненко О.И.* Комплексное моделирование динамики вод в прибрежной зоне моря при различных ветро-волновых условиях // *Український гідрометеорологічний журнал.* –2008. - №3 – С.202-213.
3. *SWAN Cycle IV, Version 40.31: user manual.* - Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Netherlands, 2004. – 110 p.
4. *Сахненко О.И., Тучковенко Ю.С.* Численная модель литодинамики прибрежных морских акваторий с учетом берегозащитных сооружений // *Экология городов и рекреационных зон.* – Одесса. –2009. – С.129-133.
5. *Океанографические таблицы/* Под ред. Мироненко З.И. – С.-П.: Гидрометеоздат, 1975. – С.234-236.
6. *Абузьяров З.К.* Морское волнение и его прогнозирование. – Гидрометеоздат, 1981. – 165 с.

Моделирование ветро-волновой динамики вод прибрежной морской акватории в районе Тилігульського лимана. Сахненко О.И., Тучковенко Ю.С.

Выполнено численное моделирование ветрового волнения и ветро-волновых течений на прибрежной морской акватории, в пределах которой расположен искусственный канал, соединяющий Тилігульський лиман с Черным морем. Использован комплекс, включающий спектральную модель ветрового волнения и численную гидродинамическую модель прибрежных ветро-волновых течений.

Ключевые слова: *северо-западная часть Черного моря, северное побережье, ветро-волновая динамика вод, численное моделирование.*

Numerical modeling of the wind-wave dynamics of water in coastal area near the Tiligul estuary. Sakhnenko O. I., Tuchkovenko Yu. S.

The numerical modeling of the wind waves and the wind-wave currents was performed for the coastal sea water area, which includes the artificial channel connecting the Tiligul's estuary with the Black Sea. The complex consisting of the spectral wave model and the wind-wave flows numerical hydrodynamic model was used.

Keywords: *the northwestern part of the Black Sea, the north coast, the wind-wave water dynamics, the numerical modeling.*