

УДК 551.466.3

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЕТРО-ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ ВОД В ТИЛИГУЛЬСКОМ ЛИМАНЕ

О. И. Сахненко, канд. геогр. наук

Одесский государственный экологический университет  
65016, г. Одесса, Украина, ул. Львовская, 15, [sakhnenko@ukr.net](mailto:sakhnenko@ukr.net)

Изучены особенности пространственного распределения основных параметров ветровых волн на акватории Тилигульского лимана. Приведены оценки придонных орбитальных скоростей волновых движений. На основании расчетов ветровых волн по численной модели SWAN (Simulation waves nearshore) построены режимные функции высот ветровых волн в характерных точках акватории лимана. Приведены результаты моделирования пространственных полей ветро-волновых течений в лимане в условиях ветров различной силы.

**Ключевые слова:** северо-западное Причерноморье, Тилигульский лиман, динамика вод, моделирование.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Тилигульский лиман отделен от Черного моря пересыпью с искусственным каналом шириной 30 м и глубиной 0.5-1.0 м, соединяющим лиман с морем. Канал функционирует эпизодически, так как замывается песком со стороны моря.

В период изоляции лимана от моря, когда соединительный канал не функционирует в течение летнего периода или нескольких лет, водный баланс лимана нарушается в сторону роста дефицита воды, поскольку испарение превышает поступление вод с бассейна лимана и с атмосферными осадками [1]. При этом уровень воды в лимане понижается, происходит перегрев вод лимана летом и переохлаждение зимой, возрастает соленость вод, концентрация загрязняющих веществ, усиливается эвтрофикация, происходит загрязнение и лечебных донных илов [2].

В связи с проведением научно-изыскательных работ по защите Тилигульского лимана от пересыхания, необходимы оценки ветро-волновой динамики вод при различных ветровых условиях. Поэтому основная цель данной работы – детальный анализ протекающих на акватории Тилигульского лимана динамических процессов, а именно:

- анализ трансформации параметров ветровых волн;
- анализ волновых параметров (высот, периодов волн, орбитальной скорости волнового движения у дна) на акватории Тилигульского лимана;
- расчет пространственных схем ветро-волновых течений на акватории Тилигульского лимана.

### 2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕЧЕНИЙ В ТИЛИГУЛЬСКОМ ЛИМАНЕ

Измерения течений в Тилигульском лимане, выполненные с 1971 по 1988 г. показали, что пространственные поля течений в лимане имеют сложную структуру, но получить детальную картину на основе инструментальных наблюдений не удалось [3].

На основании диагностической гидродинамической модели в работах [3,4] были представлены результаты расчетов баротропных ветровых течений в Тилигульском лимане. В работе [5] приведены результаты расчетов ветровой циркуляции вод, в условиях стационарных ветров малой скорости (5 м/с) северного, северо-восточного, а также западного направлений. Для расчета дрейфовых течений используется модель, основанная на решении уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости на мелкой воде в приближении Буссинеска [6]. Использование выше перечисленных моделей ветровой циркуляции применительно к Тилигульскому лиману объяснялось допущением, что доминирующее влияние на формирование циркуляции вод в лимане оказывает ветровое воздействие. Волновая составляющая течений не учитывалась при моделировании. В работе [2] приведены результаты моделирования баротропных ветровых течений в лимане в условиях слабого ветра (5 м/с).

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ ВЕТРО-ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ ВОД В ЛИМАНЕ

При моделировании волновой динамики вод, включая нелинейные взаимодействия между

волнами и сложные процессы трансформации ветровых волн в мелководном лимане, использовался спектральный подход.

Для определения режимных характеристик ветрового волнения предварительно проводился нестационарный расчет параметров ветрового волнения для акватории Тилигульского лимана с использованием натурных данных о ветре. С этой целью применялась спектральная модель SWAN (Simulating Waves Nearshore) [7], с использованием данных наблюдений за ветром, полученных за 2012 календарный год с дискретностью 6 ч. Шаг по времени в нестационарном модельном расчете ветрового волнения принимался равным дискретности наблюдений за скоростью и направлением ветра и также составлял 6 ч.

Выбор модели SWAN обусловлен тем, что она специально разработана для расчета и анализа ветрового волнения в мелководных акваториях, подобных Тилигульскому лиману. Сравнение модельных полей, полученных с помощью SWAN, и данных натурных наблюдений дает хорошее совпадение с [8].

В SWAN волны описываются двумерным волновым спектром плотности действия  $N(\sigma, \theta)$ . Плотность действия равна спектральной плотности энергии, деленной на относительную частоту

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma,$$

$\sigma$  – относительная частота,  $\theta$  – направление распространения волн.

Развитие волнового спектра описывается уравнением спектрального баланса плотности действия, которое имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

$S$  – выражение, описывающее процессы генерации, диссипации и нелинейных межволновых взаимодействий;  $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ , – скорости переноса волновой энергии в фазовом пространстве, определяемые в предположении меняющегося рельефа дна и фоновых течений на основе метода геометрической оптики.

Волновое уравнение (1) решается с нулевыми значениями  $N$  на твердых границах расчетной области. На жидких границах величина  $N$  рассчитывается через высоту и направление подходящих волн. Зная распределение  $N$ , можно определить частотно-угловой спектр поверхностного

волнения с помощью соотношения  $E = \sigma N$ , и на его основании получить оценки спектральных характеристик волнения [7].

Волновой спектр определялся с дискретностью  $4^\circ$  по угловой координате. По частотной координате использовалась неравномерная сетка с 25 узлами. Минимальная частота 0,01 Гц. Остальные частоты определялись по рекуррентной формуле. Максимальное значение высоты волны в зоне обрушения определялось соотношением  $h_{max} = \gamma h$ , где  $\gamma = 0.78$  – параметр обрушения.

### 3.1 Ветро-волновая циркуляция вод

Ветро-волновая циркуляция вод в прибрежной зоне моря описывается осредненными по глубине и периоду ветровых волн уравнениями Рейнольдса [9]:

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

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

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

где оси  $x$  и  $y$  направлены, соответственно, во вдольбереговом и поперечном направлениях;  $t$  – время;  $U$  и  $V$  – осредненные по глубине компоненты вектора скорости течений по осям  $x$  и  $y$ , соответственно;  $\xi$  – возвышение уровня свободной поверхности;  $h = h_0 + \xi$  – локальная глубина;  $h_0$  – расстояние от дна до некоторой поверхности отсчета, характеризующей невозмущенный уровень водоема;  $\rho$  – средняя плотность воды;  $f_0$  – параметр Кориолиса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\tau_{wx}$  и  $\tau_{wy}$  – компоненты тангенциальных напряжений ветра на свободной поверхности;  $\tau_{xy}, \tau_{yx}$  – турбулентные напряжения потока;  $\tau_{0x}$  и  $\tau_{0y}$  – компоненты тангенциальных напряжений потока у дна.

Турбулентные напряжения потока  $\tau_{xy}$  представляются в виде

$$\tau_{xy} = \rho \left( \varepsilon_x \frac{\partial V}{\partial x} - \varepsilon_y \frac{\partial V}{\partial y} \right),$$

где  $\varepsilon_x = const$  – коэффициент турбулентного обмена во вдольбереговом направлении;  $\varepsilon_y$  – коэффициент турбулентного обмена в поперечном направлении, значение которого определяется аналогично

$$\varepsilon_y = \frac{h_b^2 g T}{4\pi^2 h} \sin^2 \alpha.$$

Здесь  $h_b$ ,  $T$ ,  $\alpha$  – высота, период и угол подхода ветровых волн к берегу, соответственно.

Поток импульса при обрушении ветровых волн учитывают компоненты волновых радиационных напряжений. Пространственные и временные флуктуации радиационных напряжений создают силы, которые вызывают волновые течения. Компоненты волновых радиационных напряжений определялись следующим образом [9]:

$$S_{xx} = \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \cos^2 \alpha + n - 1/2),$$

$$S_{xy} = \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \sin \alpha \cos \alpha),$$

$$S_{yy} = \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \sin^2 \alpha + n - 1/2),$$

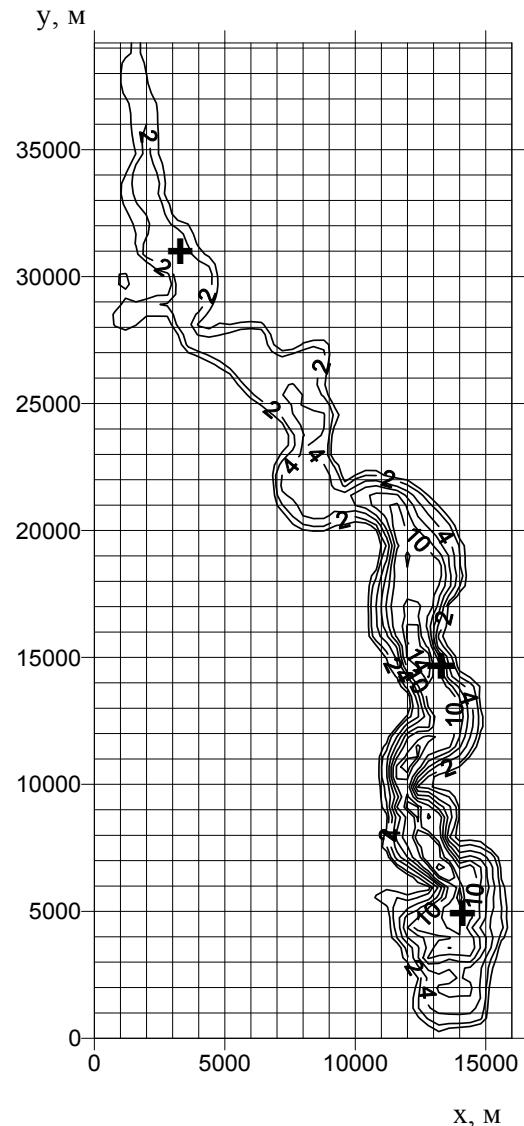
$$n = \frac{1}{2} + \frac{K_w h}{sh 2K_w h}, \quad K_w = \frac{2\pi}{\lambda},$$

где  $\lambda$  – длина ветровых волн.

Расчет трансформации и обрушения ветровых волн производился для акватории Тилигульского лимана при различных ветро-волновых условиях.

Расчетная область, включающая акваторию лимана, размером 16000 м × 39200 м, аппроксимировалось расчетной сеткой с шагами 400 м по осям  $x$  и  $y$ , направленным на восток и север, соответственно (рис. 1). Максимальные отметки глубин на исследуемой акватории, приведенные к нулю Балтийской системы, составили 16 м.

Результаты расчетов трансформации параметров волн приведены для случаев распространения волновых гребней под воздействием южного, северного, восточного и северо-западного ветров. Пространственные поля ветро-волновых течений построены для условий южных и западных ветров.



✦ – точки расчета режимных функций ветрового волнения

Рис. 1 – Пространственное распределение глубин (м) на акватории Тилигульского лимана по результатам промеров 2012 г.

#### 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРО-ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ ВОД В ЛИМАНЕ

Ветровые волны способствуют перемешиванию вод и взвешиванию донных отложений в мелководных акваториях, что, в конечном итоге, повышает транспортирующую способность потоков. Пространственное распределение зон обрушения ветровых волн имеет немаловажное значение при протекании эрозионно-аккумуляционных процессов, транспортировке и перераспределении наносов. Приведем результаты моделирования трансформации и пространственного распределения зон обрушения волн в акватории Тилигульского лимана.

На рис. 2 (а, б) приведены режимные функции и повторяемость высот. На рис. 3а - 6а представлены полученные по модельным расчетам поля высот значительных волн, распространявшихся под действием ветров различных направлений. При южном и северном ветрах наблюдается плавное уменьшение высот значительных волн, в направлении от центральной части лимана к берегам.

При слабом ветре северного направления скоростью 7 м/с высоты значительных волн на акватории Тилигульского лимана не превышают 0.34 м, максимальные модельные значения высот волн получены в его центральной и южной частях. С усилением северного ветра до 12 м/с высоты значительных волн достигают 0.55 м в южной оконечности акватории лимана а также в его центральной части на максимальных глубинах. В северной части лимана при указанном направлении ветра высоты значительных волн существенно меньше.

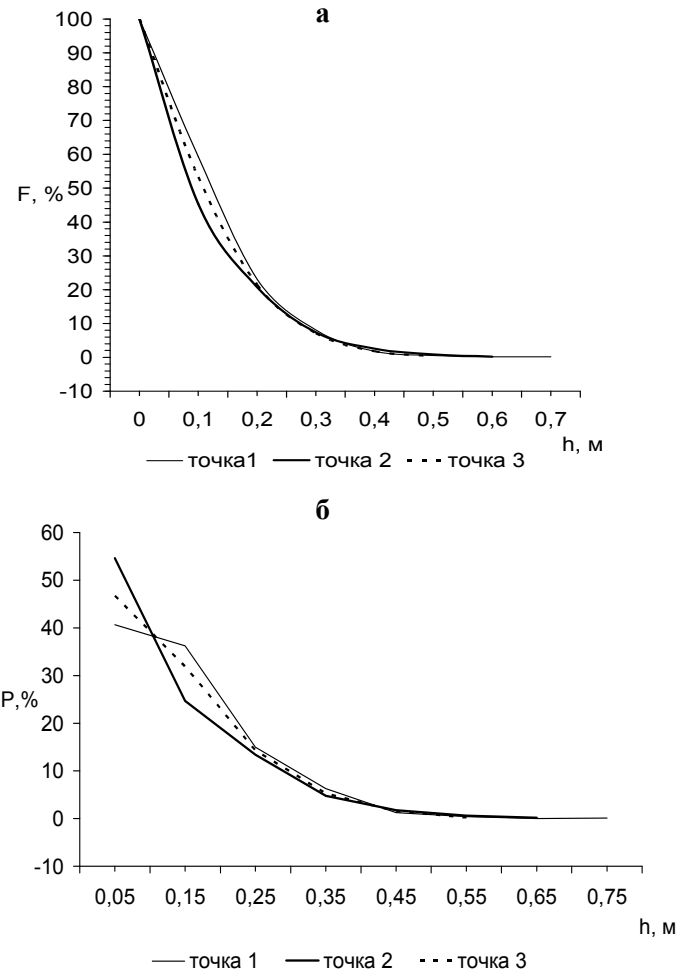
В условиях северо-западного ветра волны достигают наибольшего развития в южной и юго-восточной части лимана. У восточных берегов высоты волн больше, чем у северных и северо-западных берегов. По мере распространения по акватории Тилигульского лимана фронт волны разворачивается и стремится занять положение, параллельное береговой черте. Таким образом, проявляются эффекты рефракции ветровых волн, связанные с неоднородностью глубин. При северо-западном ветре скоростью 12 м/с высоты значительных волн составляют не более 0.5 м в восточной части акватории, и постепенно уменьшаются в направлении с востока на запад. При действии северо-западного ветра южное и восточное побережье оказываются для волнения с подветренной стороны, поэтому высоты волн здесь меньше, чем в восточной части акватории лимана. При восточном ветре той же силы наблюдается обратная картина. Максимальных высот волны достигают у восточного побережья, составляя 0.45 - 0.55 м, и 0.35 - 0.45 м – на остальной части акватории лимана.

При ветре южного направления волны максимальны в центральной глубоководной части акватории лимана. С увеличением скорости южного ветра до 14 м/с волны достигают наибольшего развития в центральной части лимана а также в южной оконечности акватории у наветренных берегов, где их высота составляет 0.75 м.

#### 4.1 Режимные функции ветрового волнения

При штормовых ветрах наибольшие высоты

значительных волн, согласно результатам моделирования за календарный 2012 год, составляют 0.83 м. Обеспеченность высоты значительной волны 0.5 м колеблется по акватории лимана от 0.55 % в северной ее оконечности (точка 3) до 1.9 % (точка 1) в южной более глубоководной части. Режимные функции и повторяемости высот значительных волн рассчитаны для его северной, центральной и южной части:



точки 1, 2, 3 соответствуют южной, центральной и северной частям акватории лимана

Рис. 2 – Режимная функция (а) и повторяемость (б) высот значительных волн на акватории Тилигульского лимана согласно модельным расчетам волновых полей по данным наблюдений за 2012 год.

#### 4.2 Средний период и длина ветровых волн, орбитальная скорость волнового движения у дна

Средний по спектру период волн на рассматриваемой акватории меняется незначительно (рис. 3б-6б). При слабом ветре скоростью 7 м/с средний ветровых волн практически не меняется по мере распространения волн по акватории, оставаясь равным 1.4 - 1.6 с.

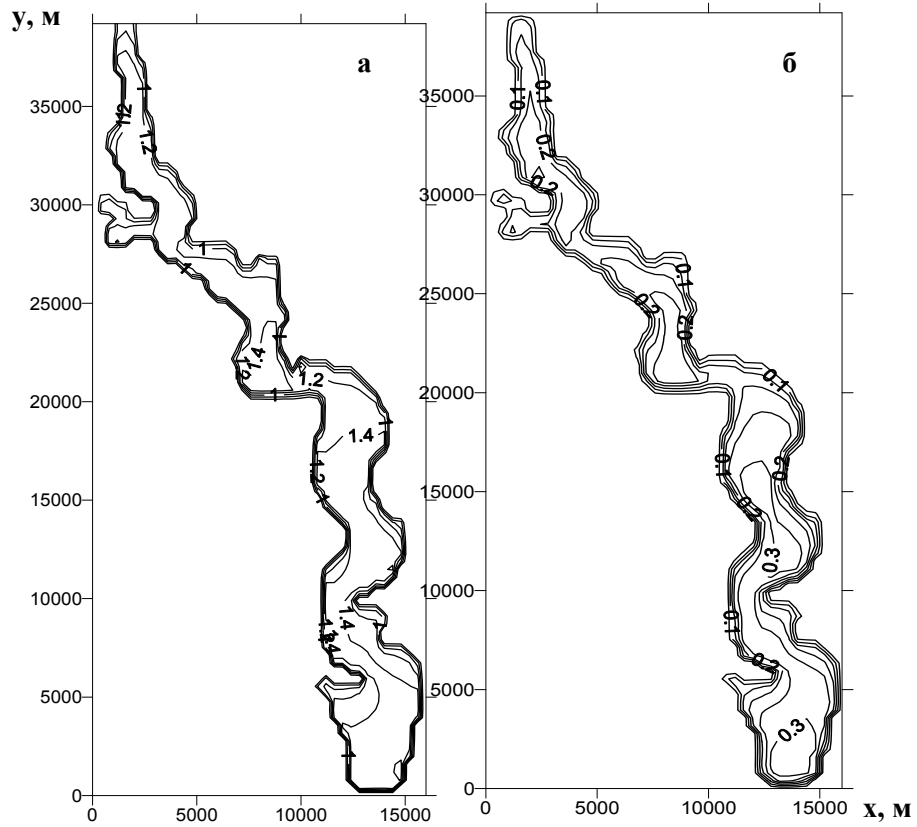


Рис. 3 – Пространственное распределение высот (а) значительных волн и (б) средних периодов волн в метрах на акватории Тилигульского лимана при северном ветре скоростью 7 м/с.

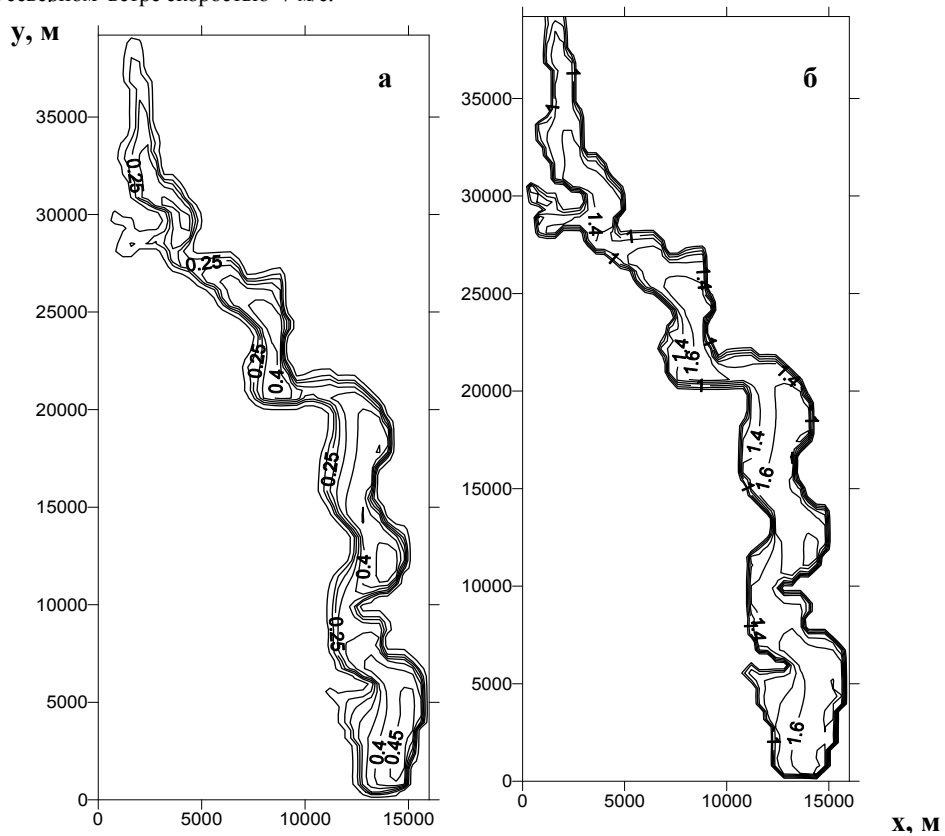


Рис. 4 – Пространственное распределение высот (а) значительных волн и (б) средних периодов волн в метрах на акватории Тилигульского лимана при северо-западном ветре скоростью 10 м/с.

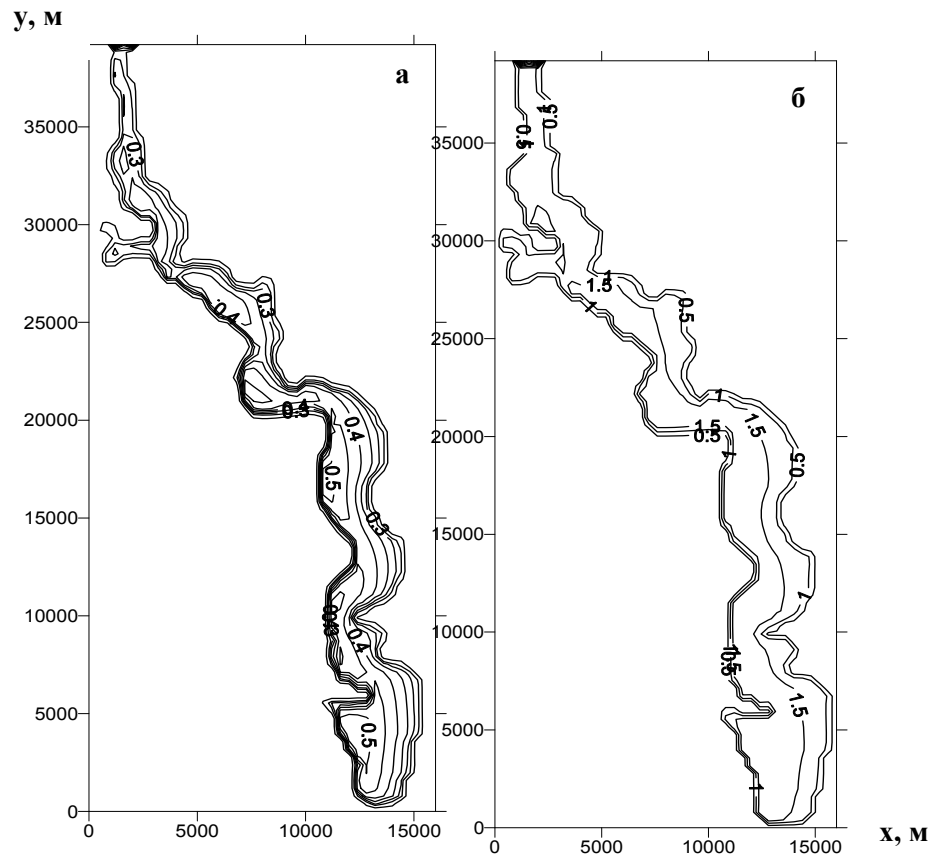


Рис. 5 – Пространственное распределение высот (а) значительных волн и (б) средних периодов волн в метрах на прибрежной акватории Тилигульского лимана при восточном ветре 12 м/с.

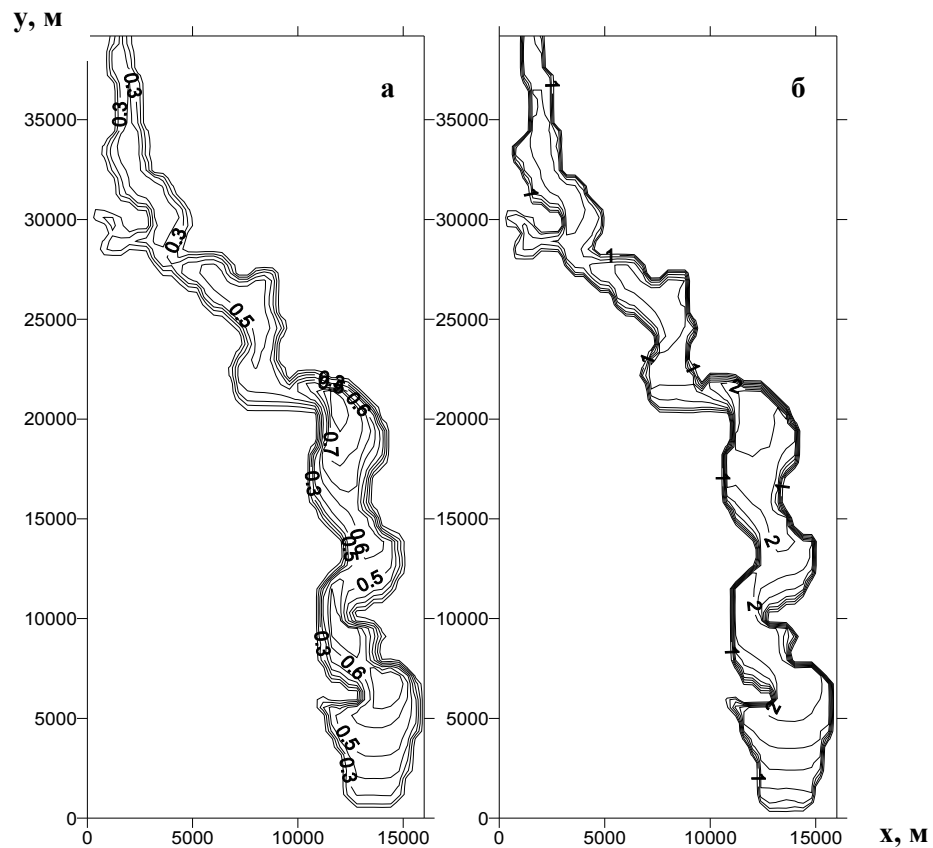


Рис. 6 – Пространственное распределение высот (а) значительных волн и (б) средних периодов волн в метрах на акватории Тилигульского лимана при южном ветре скоростью 14 м/с.

Средний по спектру период волн при южном ветре скоростью 10 м/с составляет 1.8 с.

Причиной изменения среднего периода волн по мере их распространения являются нелинейные взаимодействия между ветровыми волнами, которые учитываются при моделировании.

В условиях северо-западного ветра скоростью 12 м/с средний период не более 2.0 с. При распространении волн по акватории под действием северо-западного ветра их средний период достигает максимальных значений в центральной части, а также у западного наветренного берега.

При северо-западном ветре силой 10 м/с к северо-западным берегам подходят волны средней длиной до 3.8 м. В северной части акватории Тилигульского лимана средние длины волн составляют не более 2 м. При усилении ветра, а также по мере приближения волновых гребней к центральной и южной глубоководной части Тилигульского лимана, средняя длина волны возрастает. С усилением ветра южного направления до 14 м/с средние длины волн увеличиваются по результатам модельных расчетов до 5.5 – 6.0 м в центральной и южной наиболее глубоководной части лимана, составляя в северной мелководной оконечности акватории не более 3 м как при северном, так и при южном направлении ветров.

Средняя длина ветровых волн при слабом северном ветре 7 м/с составляет по акватории лимана 2.5 - 3.0 м.

При восточном ветре силой 12 м/с длины волн у восточных берегов достигают 4.5 м.

В пространственном распределении орбитальной скорости волнового движения прослеживается зона интенсификации, ориентированная вдоль береговой линии.

Максимальные значения орбитальной скорости волнового движения у дна, полученные по результатам моделирования при северном и северо-западном ветрах, прослеживаются в районе изобат 2 и 3 м. В условиях северо-западного ветра со скоростью 12 м/с орбитальная скорость составляет 0.12 - 0.15 м/с.

При южном штормовом ветре орбитальная скорость увеличивается от центральной наиболее глубоководной области в сторону берегов, а затем уменьшается с полным разрушением ветровых волн на береговой отмели.

В узкой прибрежной полосе максимальные значения отмечаются как в восточной, так и в западной части лимана, у южных извилистых берегов. При штормовых ветрах скорость орбитального движения у дна в своем пространственном распределении характеризуется наличи-

ем максимумов, сориентированных вдоль побережья.

При слабом северном ветре величина крутизны ветровых волн варьирует в пределах 0.10 - 0.12, достигая наибольших значений в наиболее глубоководных районах центральной и южной акватории лимана. При ветре скоростью 12 м/с величина крутизны ветровых волн достигает 0.15, и в зависимости от направления ветра ее максимальные значения отмечаются, согласно расчетам, у восточных берегов при северо-западном ветре и у западного побережья в восточной части акватории при восточном ветре.

### 4.3 Ветро-волновые течения

Расчитанные поля течений приведены на рис. 7, 8. При южном ветре 7 м/с максимальные скорости течений получены, согласно модельным расчетам, у западных берегов в восточной части акватории Тилигульского лимана. Волны подходят к нему под углом, поэтому здесь формируется вдольбереговое ветро-волновое течение со скоростью до 17 см/с. Общее направление течения – на север и северо-запад. Средняя по глубине скорость течения в центральной наиболее глубоководной части лимана - не более 3 - 5 см/с.

При южном штормовом ветре 14 м/с вдольбереговой поток, направленный с юго-востока на северо-запад, усиливается. Максимальные скорости течений в прибрежной полосе отмечаются у восточных и западных берегов, достигая 34 см/с. В центральной и западной частях акватории общий поток направлен противоположно - на юг.

У береговой отмели прослеживается увеличение скоростей течений за счет обрушения ветровых волн. Интенсивная циркуляция вод береговой полосы обусловлена высвобождением энергии волн при их разрушении по мере подхода к берегу. Течения возникают как результат процессов диссипации энергии и потери импульса в волнах и проявляются на фоне орбитальных движений частиц воды.

При западном ветре формируется достаточно интенсивный прибрежный поток, обусловленный вдольбереговой составляющей ветра. У северных берегов течение направлено на восток, со скоростью до 15 см/с.

У западных и юго-западных берегов скорости течения максимальны и достигают при ветре скоростью 10 м/с значений 21 см/с. Вдоль берегов Тилигульского лимана основной поток воды

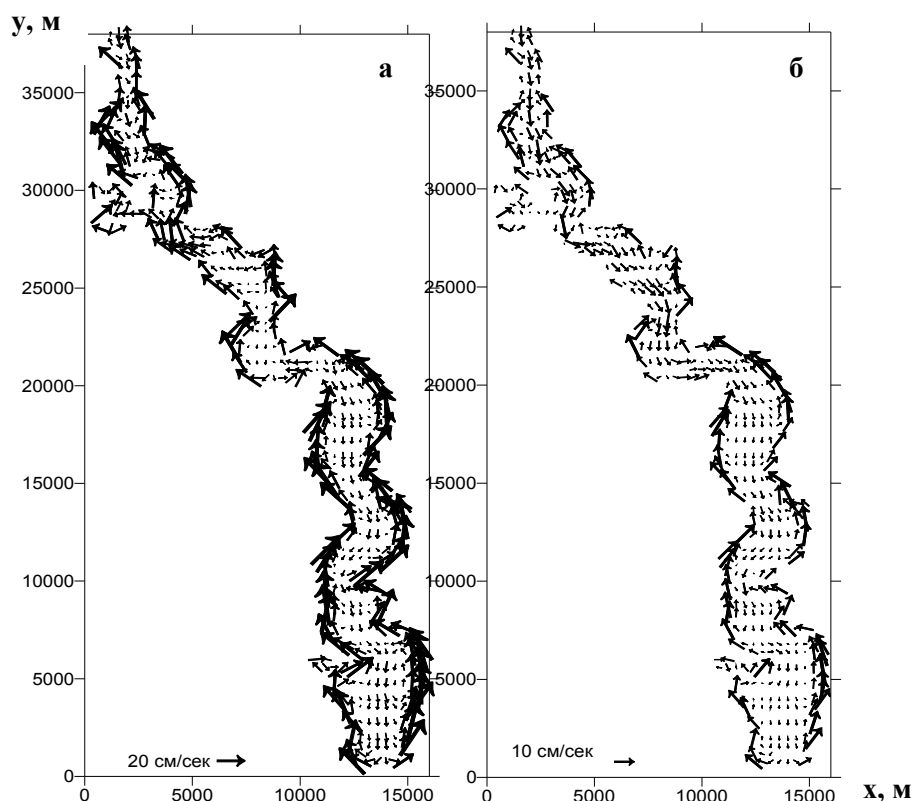


Рис. 7 - Течения на акватории Тилигульского лимана по результатам модельных расчетов при южном ветре 14 м/с (а) и 7 м/с (б).

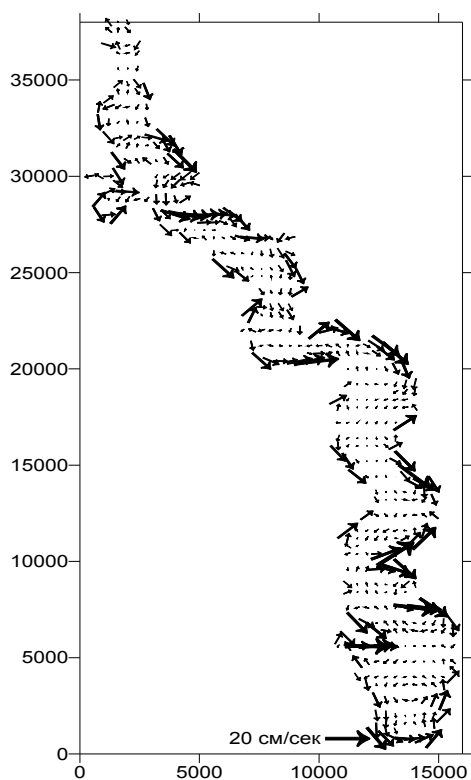


Рис. 8 - Течения на акватории Тилигульского лимана по результатам модельных расчетов при западном ветре 10 м/с.

при западном ветре направлен на юго-восток и восток. На остальной части акватории лимана, согласно полученным результатам, присутствуют вихревые образования.

Общее направление перемещения при западном ветре согласуется с полученным в [5], однако при расчете течений в комплексе моделей ветро-волновых циркуляций, вихревые образования становятся менее выраженными, чем в расчетах по ветровой модели [5].

## 5. ВЫВОДЫ

В результате адаптации комплекса моделей ветрового волнения и ветро-волновой циркуляции вод к условиям акватории Тилигульского лимана, изучены особенности волновой динамики при различных направлениях и скоростях ветра.

Выполнено моделирование ветрового волнения при различных скоростях ветра южного, северного, восточного и северо-западного направлений с использованием спектральной модели.

Максимальные высоты значительных волн получены в центральной, наиболее глубоководной части лимана, а также в южной оконечности



акватории и у наветренных берегов.

При штормовых ветрах максимальные высоты значительных волн, согласно результатам моделирования за период календарного 2012 года, составляют 0.83 м.

Обеспеченность высоты значительной волны 0.5 м варьирует по акватории лимана от 0.55 % в северной части до 1.9 % - в южной его оконечности.

При южном ветре вдольбереговой поток направлен с юго-востока на северо-запад. Максимальные скорости течений в прибрежной полосе отмечаются в восточной части акватории лимана. В центральной части акватории течение противоположно направленное, южное.

Основной поток воды вдоль берегов акватории Тилигульского лимана при западном ветре направлен на восток и юго-восток.

С учетом большого числа влияющих факторов, таких как волновые течения, волновой нагон, рассчитана сложная структура течений в Тилигульском лимане при ветрах различной силы и направлений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адобовский В. В. Современные процессы высыхания и осолонения лиманов с ограниченным водообменом // Экологічні проблеми Чорного моря. Одеса, 2002. С. 3-8.
2. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья: монография / под ред. Ю. С. Тучковенко, Е. Д. Гопченко. Одесса: ТЭС, 2012. 224 с.
3. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов северо-западного Причерноморья: монография. Киев: Наукова думка, 1990. 238 с.
4. Лиманы Северного Причерноморья: монография / В. С. Полишук и др.; под ред. О. Г. Миронова; Ин-т гидробиологии АН УССР. Киев: Наукова думка, 1990. 204 с.
5. Тучковенко Ю. С., Кушнир Д. В. Моделирование ветровой циркуляции вод в Тилигульском лимане // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2013. Вип. 16. С. 149-158.
6. *Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments: user Manual, version 3.15.* Deltares systems, Delft, the Netherlands, 2013. 702 p.
7. *SWAN Cycle IV, Version 40.31: user manual.* Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Netherlands, 2004. 110 p.
8. Ris R. C., Booij N., Holtuijzen L. H. A third generation wave model for coastal regions. Part II. *Verification J. of Geoph. Res.*, 1999, no. 104, pp. 7667-7681.
9. 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.

#### REFERENCES

1. Adobovskiy V. V. Modern processes of drying and salinity of estuaries with limited water exchange. *Ecological problems of Black Sea.* Odessa, 2002, pp. 3-8. (In Russian)
2. Tuchkovenko Yu. S., Gopchenko E. D. (Eds). *Actual'nye problemy limanov severo-zapadnogo Prichernomor'ya* [Actual problems of lagoons of the north-western Black Sea coast]. Odessa: TES, 2012. 224 p.
3. Timchenko V. M. *Ekologo-gidrologicheskiye issledovaniya vodoemov severo-zapadnogo Prichernomor'ya* [Ecological and hydrological studies of the north-western Black Sea coast]. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1990. 240 p.
4. Polishuk V. S., Timchenko V. M. etc. *Limany severnogo Prichernomor'ya.* [Lagoons of the north-western Black Sea coast]. The AS USSR Institute of Hydrobiology. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1990. 204 p. (Ed.: Mironov O. G.).
5. Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D. V. Modelling of wind-driven circulation of water in the Tiligul estuary. *Visn. Odes. derz. ekol. univ. - Bulletin of Odessa State Environmental Univ.*, 2013, vol. 16, pp. 149-158. (In Russian).
6. *Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments: user Manual, version 3.15.* Deltares systems, Delft, the Netherlands, 2013. 702 p.
7. *SWAN Cycle IV, Version 40.31: user manual.* Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Netherlands, 2004. 110 p.
8. Ris R. C., Booij N., Holtuijzen L. H. A third generation wave model for coastal regions. Part II. *Verification J. of Geoph. Res.*, 1999, no. 104, pp. 7667-7681.
9. Tuchkovenko Yu. S., Sakhnenko O. I. The complex modeling of the water dynamic on the beach zone under the different wave-wind conditions. *Ukr. gidrometeorol. ž. - Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 2008, no. 3, pp. 202-213. (In Russian).

## RESULTS OF CALCULATION OF WAVE-WIND WATER DYNAMICS AT THE TILIGUL ESTUARY

Sakhnenko O. I, Cand. Sci.(Geogr.), senior lecturer

Odessa State Environmental University, 15,  
Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, [sakhnenkoo@ukr.net](mailto:sakhnenkoo@ukr.net)

Features of spatial distribution of the main parameters of wind waves, such as height, average

period, average length, in the waters of the Tiligul Estuary were studied. Estimates of the bottom orbital velocities of wave motions determining transportation of bottom material were specified. Maximum heights of significant waves were obtained in the central, most deep-water part of the estuary, as well as in the southern part and near the windward shores. At the time of storm winds maximum heights of significant waves, according to the simulation results, constitute up to 0,83 m. On the basis of calculations of wind waves with application of the SWAN numerical model (Simulating WAVes Nearshore) made using wind observations during 2012, regime functions of wind waves' heights for different parts of the estuary were built. Statistical estimates of wind waves' heights at typical points of the estuary waters were analyzed. Spatial fields of wind-wave flows in the estuary under the influence of steady winds of the southern and western directions calculated using the complex of numerical mathematical models of wind wave generation and models of wind-wave water circulation based on Reynolds equations and supplemented with components of the wave radiation stresses were specified.

**Keywords:** North-Western Black Sea coast, the Tiligul Estuary, water dynamics, numerical modelling.

## РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВІТРО-ХВИЛЬОВОЇ ДИНАМІКИ ВОД В ТИЛІГУЛЬСЬКОМУ ЛИМАНІ»

**О. І. Сахненко**, канд. геогр.наук

*Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [sakhnenkoo@ukr.net](mailto:sakhnenkoo@ukr.net)*

Вивчено особливості просторового розподілу основних параметрів вітрових хвиль, таких як висота, середній період, середня довжина, на акваторії Тилигульського лиману. Наведено оцінки придонних орбітальних швидкостей хвильових рухів, що визначають транспорт донного матеріалу. Максимальні висоти значних хвиль отримані в центральній, найбільш глибоководній частині лиману, а також в південній частині акваторії та у навітряних берегах. При штормових вітрах максимальні висоти значних хвиль, згідно з результатами моделювання, становлять 0.83 м. На підставі розрахунків вітрових хвиль за чисельною моделлю SWAN (моделювання хвиль поблизу берегів), виконаних з використанням даних спостережень за вітром за 2012 рік, побудовані режимні функції висот вітрових хвиль для різних частин лиману. Проаналізовано статистичні оцінки висот вітрових хвиль в характерних точках акваторії лиману. Наведено просторові поля вітро-хвильових течій в лимані в умовах дії стаціонарних вітрів південного та західного напрямків, розраховані з використанням комплексу чисельних математичних моделей вітрового хвилювання та моделі вітро-хвильової циркуляції вод, заснованої на рівняннях Рейнольда та доповненої компонентами хвильових радіаційних напружень.

**Ключові слова:** північно-західне Причорномор'я, Тилигульський лиман, динаміка вод, моделювання.

*Дата першого подання: 03. 05. 2016*

*Дата надходження остаточної версії: 31. 10. 2016*

*Дата публікації статті: 24. 11. 2016*