

О.И. Сахненко, к.г.н.

Одесский государственный экологический университет

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ И ВЕТРО-ВОЛНОВОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В КЕРЧЕНСКОЙ БУХТЕ ПРИ ЧЕРНОМОРСКОМ ПОТОКЕ ЧЕРЕЗ ПРОЛИВ

Выполнено комплексное моделирование ветрового волнения и ветро-волновых течений в Керченской бухте при южном ветре, генерирующем черноморский поток вод через пролив.

Ключевые слова: Керченская бухта, ветро-волновая циркуляция вод

Введение. В условиях современных изменений климата и антропогенных воздействий на морские экосистемы Керченский пролив служит естественным передаточным звеном для взаимодействий вод Черного и Азовского морей. Экосистема самой Керченской бухты подвержена существенным изменениям, что не может не сказаться на характере ее хозяйственного использования и морфологии. Для исследования системы течений в Керченской бухте рассмотрим следующие схемы циркуляции вод, которые были получены различными авторами в разное время.

Самые ранние схемы, основанные на обобщении массива инструментальных наблюдений за течениями за время с 1960 по 1980, были предложены Альтманом [1]. Они отражают циркуляции в Керченском проливе при генеральных переносах вод из Черного моря в Азовское и из Азовского в Черное, до сооружения дамбы (рис. 1). Затем появились аналогичные схемы [2], которые основаны на материалах эмпирической выборки (с 2003 по 2006 годы), включившей как спутниковые, так и инструментальные наблюдения за течениями в Керченском проливе. Эти измерения дают представления о течениях в ситуации после сооружения дамбы (рис. 2). И, далее, – схемы, рассчитанные путем численного моделирования, также отражающие циркуляцию вод в проливе в зависимости от направления преобладающих ветров (рис. 3, [3]).

Система локальных течений в Керченской бухте, представление о которой дают обобщенные эмпирические данные (рис. 1, 2), отлична от системы течений, полученной путем численного моделирования (рис. 3).



Рис. 1 - Типовые схемы циркуляции вод в Керченском проливе до строительства дамбы по Э.Альтману [1], основанные на эмпирических данных: а – черноморский поток, б – азовский поток.

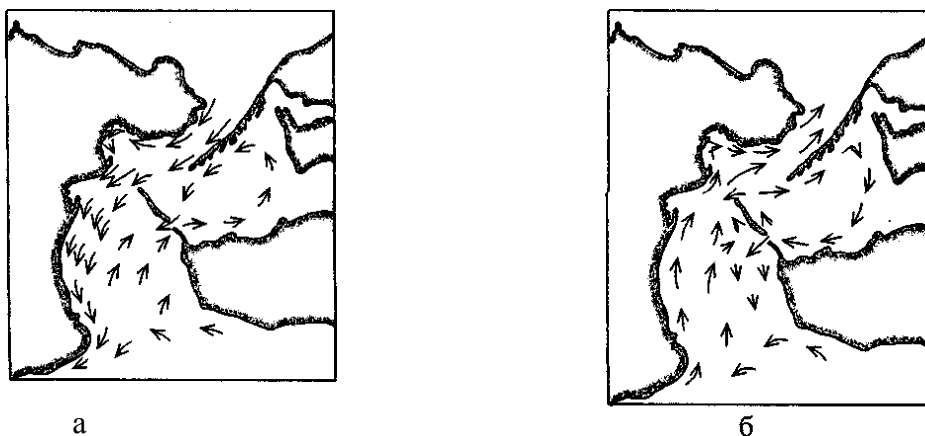


Рис. 2 - Типовые схемы циркуляции вод в Керченском проливе, основанные на эмпирических данных, после строительства тузлинской дамбы: а – азовский поток, б – черноморский поток [2].

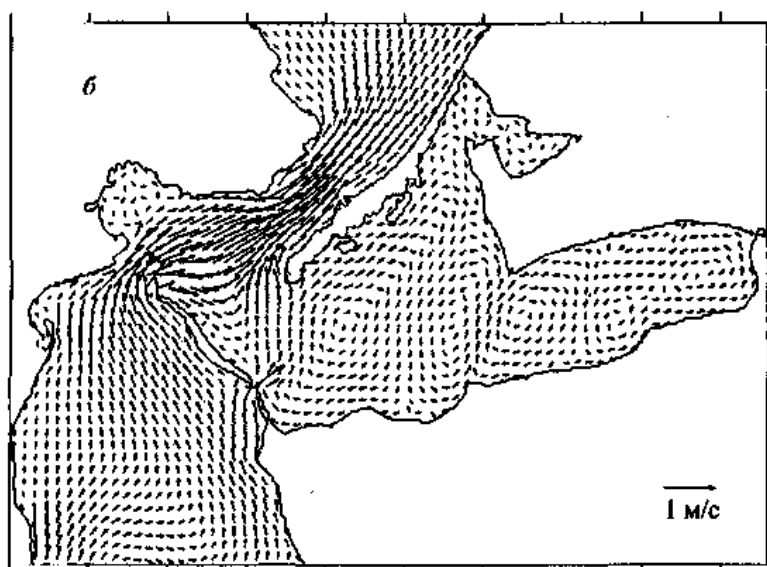


Рис. 3 - Скорость (см/с) и направление средних по глубине дрейфово-градиентных течений при южном (б) ветре по результатам численного моделирования [3].

То есть, согласно наблюдениям, система локальной циркуляции в бухте достаточно стабильна и представлена струей течения, обтекающей ее берега. Эта струя отделяется от основного потока, пересекающего северную часть пролива, и в зависимости от направления генерального переноса вод изменяет знак завихренности в бухте. При черноморских течениях в Керченской бухте преобладает антициклональная циркуляция вод и циклоническая - при азовских.

В работе [4] моделирование течений в Керченском проливе было выполнено с использованием линейной теории без горизонтального обмена количеством движения; рассчитаны течения, обусловленные совместным действием ветра и фонового переноса вод. По теоретическим схемам [3] основной поток вод через пролив при любом направлении ветра слабо проникает в Керченскую бухту, в большей степени обтекает ее восточную мористую область. В самой бухте нет струйных потоков, здесь преобладают слабые неустойчивые течения, формирующие вихревые образования различного знака

(рис. 3). В связи с этим вопрос о динамике вод в Керченской бухте требует дальнейшего детального изучения, что и является **целью** данной **работы**.

В рамках кафедральной темы №0109U006776 [5] выполнено комплексное моделирование ветрового волнения и течений в Керченской бухте при черноморском потоке вод в Керченском проливе, направленном в Азовское море.

Материалы и методы исследования. Расчет трансформации и обрушения ветровых волн, а также течений производился на акватории при ветро-волновых условиях различной обеспеченности. При моделировании вышеуказанных процессов, включая нелинейные взаимодействия между волнами, использовался комплекс математических моделей [6]. Комплекс включает блок расчета ветрового волнения, в качестве которого выступает спектральная модель SWAN [7], основанная на решении уравнения баланса волновой энергии, блок расчета ветро-волновых течений в прибрежной зоне моря и литодинамический блок [8].

Пространственные поля средней высоты, длины, периода ветровых волн, рассчитанные с учетом трансформации и обрушения волн, используются в качестве входной информации в гидродинамический блок.

Гидродинамический блок разработан таким образом, что в нем производится расчет значений волновых радиационных напряжений, определяющих характер волновой циркуляции на акватории. Ветро-волновая циркуляция вод в прибрежной зоне моря описывается осредненными по глубине и периоду ветровых волн уравнениями Рейнольдса

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

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

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

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; ξ – возвышение уровня свободной поверхности; $h = h_0 + \xi$ – локальная глубина; h_0 – расстояние от дна до некоторой поверхности отсчета, характеризующей невозмущенный уровень водоема; ρ – средняя плотность воды; f_0 – параметр Кориолиса; g – ускорение свободного падения; τ_{wx} и τ_{wy} – компоненты тангенциальных напряжений ветра на свободной поверхности, τ_{xy} – турбулентные напряжения потока, τ_{0x} и τ_{0y} – компоненты тангенциальных напряжений потока у дна.

В случае, если индуцируемой волнами циркуляцией вод в прибрежной зоне нельзя пренебречь, для описания динамики она должна быть адекватно описана и учтена в гидродинамической модели.

Поток импульса при обрушении ветровых волн учитывают компоненты волновых радиационных напряжений. Пространственные и временные флуктуации волновых радиационных напряжений создают силы, которые вызывают волновые течения.

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} – компоненты волновых радиационных напряжений, определяемые следующим образом :

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

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

λ – длина ветровых волн, h_b , α – высота и угол подхода ветровых волн к берегу, соответственно.

Поле глубин акватории Керченской бухты размером 6250×6400 м, аппроксимировалось расчетной сеткой с шагом 250 м и 200 м по осям x и y , направленным на восток и север, соответственно (рис. 4).

Расчеты трансформации параметров волн производились для случая подхода волновых гребней в направлении, нормальном к южной границе области, т.е. под воздействием южного ветра.

Полагалось, что волнение генерируется ветром силой 8, 14 и 20 м/с южного направления. На открытой морской, т. е. южной границе расчетной области, задавались средний период и средняя высота волн. Средние характеристики волнения находились из эмпирических соотношений, связывающих их со скоростью ветра, длиной разгона и глубиной водоема [9]. Высота значительной волны h_s определялась из соотношения, связывающего ее со средней высотой волны \bar{h} [10]:

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

Волновой спектр определялся с дискретностью 4^0 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 в [7] соотношением $h_{\max} = \gamma H$, где $\gamma = 0.78$ – параметр обрушения.

Параметры установившегося ветрового волнения на открытой морской границе акватории при различных скоростях ветра, рассчитанные с помощью [9, 10], приведены в табл.1.

Таблица 1 Параметры ветрового волнения на открытой морской границе акватории при различных скоростях ветра

Скорость ветра, м/с	8	14	20
Средняя высота \bar{h} , м	0,8	1,1	1,6
Высота значительной волны h_s , м	1,3	1,8	2,6
Средний период $\bar{\tau}$, с	4,4	4,8	5,4

Каждая модель применялась для решения своей частной задачи, но, в целом, эти модели позволяют достигнуть конечный результат - поля ветро-волновых течений - за счет того, что гидродинамическая модель использует в качестве исходной информации результаты, полученные с помощью модели трансформации волнения.

У, м

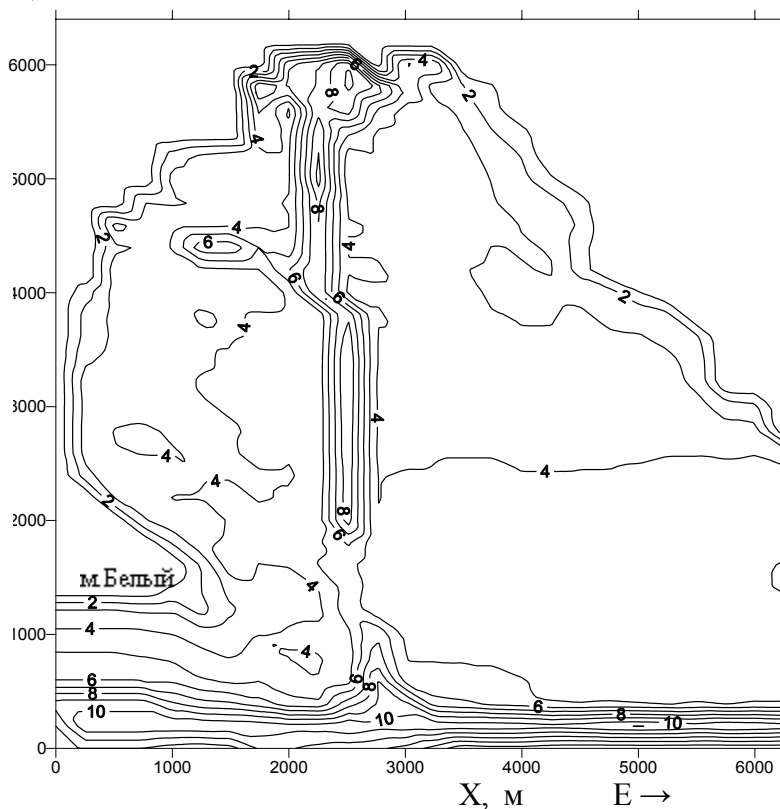


Рис.4 – Пространственное распределение глубин на акватории Керченской бухты в метрах.

Комплексное моделирование ветро-волновой динамики вод выполнялось в пределах акватории Керченской бухты. Шаг по времени принимался равным 0,1 с.

Расчеты полей течений проводились для южного ветра силой 8, 14 и 20 м/с. На жидких границах задавались составляющие вектора скорости течений, полученные по данным инструментальных измерений. На твердой границе принималось условие $U = V = 0$. В ходе численных экспериментов решалась задача приспособления поля течений к особенностям топографии дна и стационарным краевым условиям. Расчеты проводились до установления поля течений. Время установления циркуляции вод определялось путем вычисления на каждом временном шаге кинетической энергии поля течений. Поле течений считали установившимся, если его кинетическая энергия существенно не изменялась с течением времени. Период времени 3 ч оказался вполне достаточным для получения стационарной картины циркуляции.

Обрушение ветровых волн в Керченской бухте. Приведем результаты моделирования трансформации и пространственного распределения зон обрушения волн в Керченской бухте. Пространственное распределение зон обрушения ветровых волн имеет немаловажное значение при протекании эрозионно-аккумуляционных процессов, транспортировке и перераспределении наносов.

Расчитанные поля изменчивости высот ветровых волн на акватории Керченской бухты при южном ветре приведены на рис.5-7. По мере подхода к береговой черте высота моделируемой волны уменьшается. Высота значительной волны существенно

уменьшается - от 1.3 м при слабом ветре и от 1.9- при штормовых ветрах южного направления силой 14 м/с, от 2.6 м - при штормовых ветрах южного направления силой 20 м/с. По мере продвижения волн по прибрежному мелководью их обрушение происходит постепенно. Окончательное разрушение волн наблюдается в прибрежной зоне, о чем свидетельствует сгущение у береговой линии изолиний высот значительных волн. На рис.8 приведено пространственное распределение орбитальной скорости волнового движения у дна на акватории Керченской бухты при южном ветре силой 14 м/с.

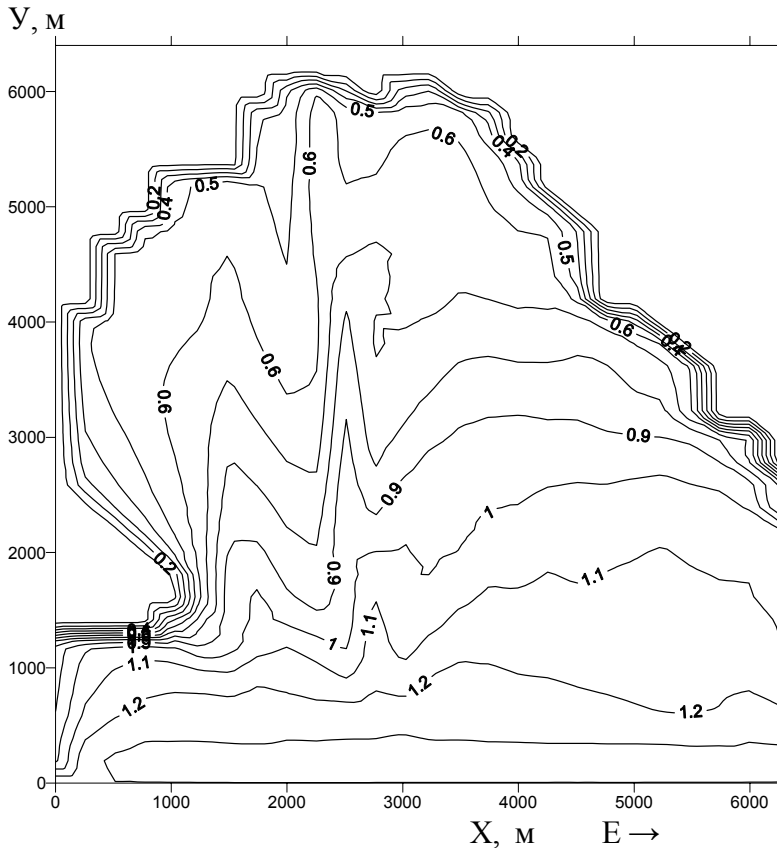


Рис.5 – Пространственное распределение высот значительных волн в метрах на акватории Керченской бухты при южном ветре силой 8 м/с.

Прибрежные ветро-волновые течения в Керченской бухте при черноморском потоке через пролив. Приведем результаты исследования динамики вод методом совместного моделирования прибрежной циркуляции вод на акватории Керченского пролива. На рис.9-11 представлены расчетные схемы течений, сформированные в результате совместного воздействия ветра силой 8, 14 и 20 м/с и генерируемого им ветрового волнения при южном ветре в Керченской бухте.

При слабом ветре силой 8 м/с формируются две циркуляционные ячейки, в восточной и центральной частях бухты. С увеличением скорости ветра от 8 до 20 м/с усиливается циркуляционная ячейка в центральной части прибрежного бассейна. Скорости течений на периферии круговоротов составляют в среднем 15-20 см/с, до 35 см/с - при штормовых условиях. Расположение круговоротов определяется не только неоднородностями донного рельефа, но и зависит от конкретных ветро-волновых параметров.

При южном ветре силой 20 м/с в прибрежной области формируется интенсивная циркуляция, для которой характерно наличие вихревых образований противоположного знака завихренности.

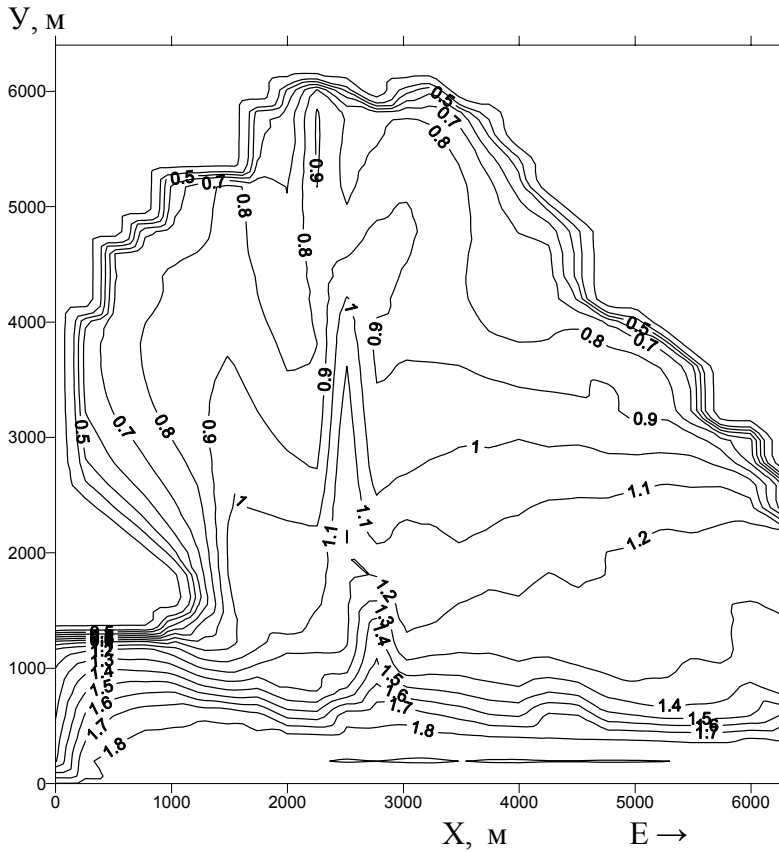


Рис.6 – Пространственное распределение высот значительных волн в метрах на акватории Керченской бухты при южном ветре силой 14 м/с.

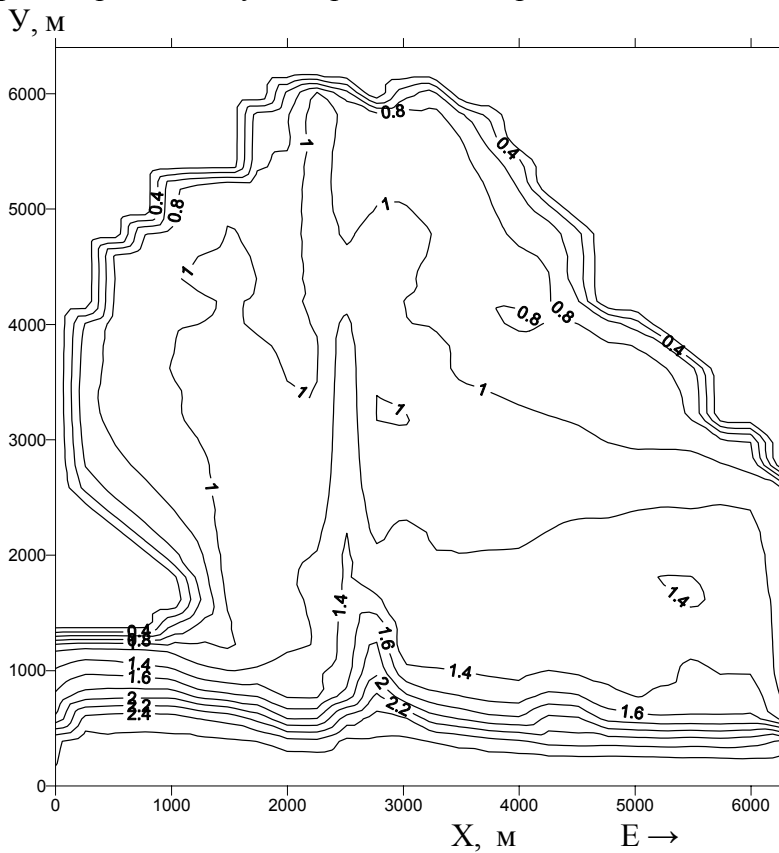


Рис.7 – Пространственное распределение высот значительных волн в метрах на акватории Керченской бухты при южном ветре силой 20 м/с.

От периферии к центральной части круговоротов значения скоростей течений резко уменьшаются.

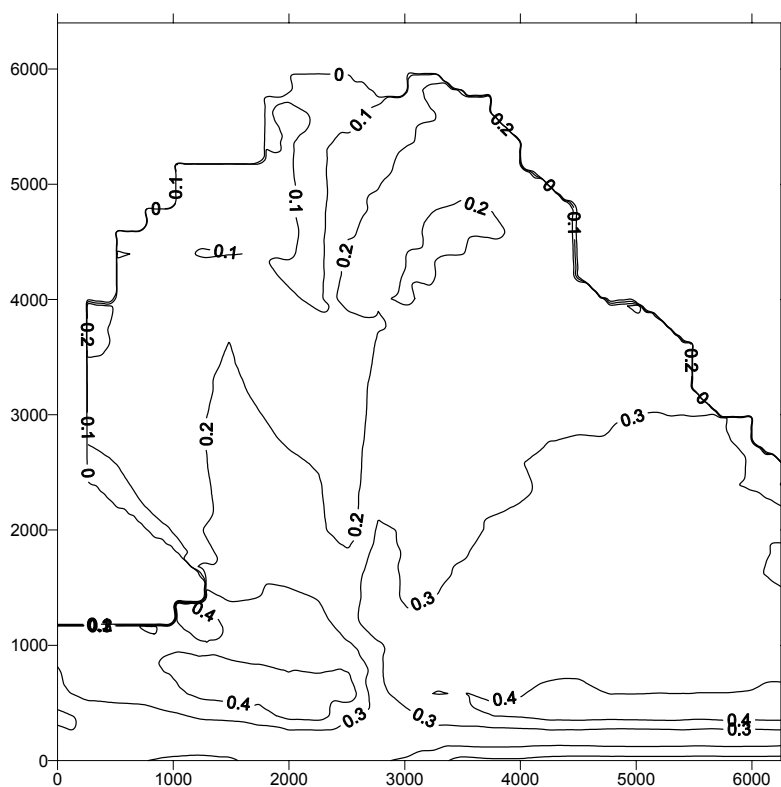
Интенсивная циркуляция вод на прибрежной акватории в районе мыса Белый обусловлена концентрированием волновой энергии и высвобождением энергии волн при их постепенном разрушении по мере подхода к мысу.

В условиях слабых ветров циркуляция вод выражена слабее, чем при штормовых. В то же время отмечаются области повышенных скоростей течений, соответствующие основным участкам обрушения ветровых волн.

При подходе волн по нормали к м. Белый отмечается увеличение вдольбереговой составляющей скорости течения по сравнению с другими участками береговой линии.

Другая зона с повышенными значениями скоростей течений - это восточные и северо-восточные берега. В ходе окончательного разрушения ветровых волн и волнового нагона при слабом ветре здесь формируется вдольбереговой поток водных масс. Средняя скорость течения в потоке составляет 20-30 см/с – при ветре силой 8 м/с.

У, м



X, м E →

Рис.8 – Пространственное распределение орбитальной скорости волнового движения у дна на акватории Керченской бухты при южном ветре силой 14 м/с.

При усилении ветра до 20 м/с образуется структура прибрежной циркуляции, включающая отдельные вихревые образования циклонического и антициклонического типов. В центральной и восточной частях бухты формируются циклоны. Полученный результат близок к результатам, полученным в [2], и подтверждает адекватность расчетов.

Сходимость ветровых волн на мысе Белый и их дальнейшее обрушение приводит к

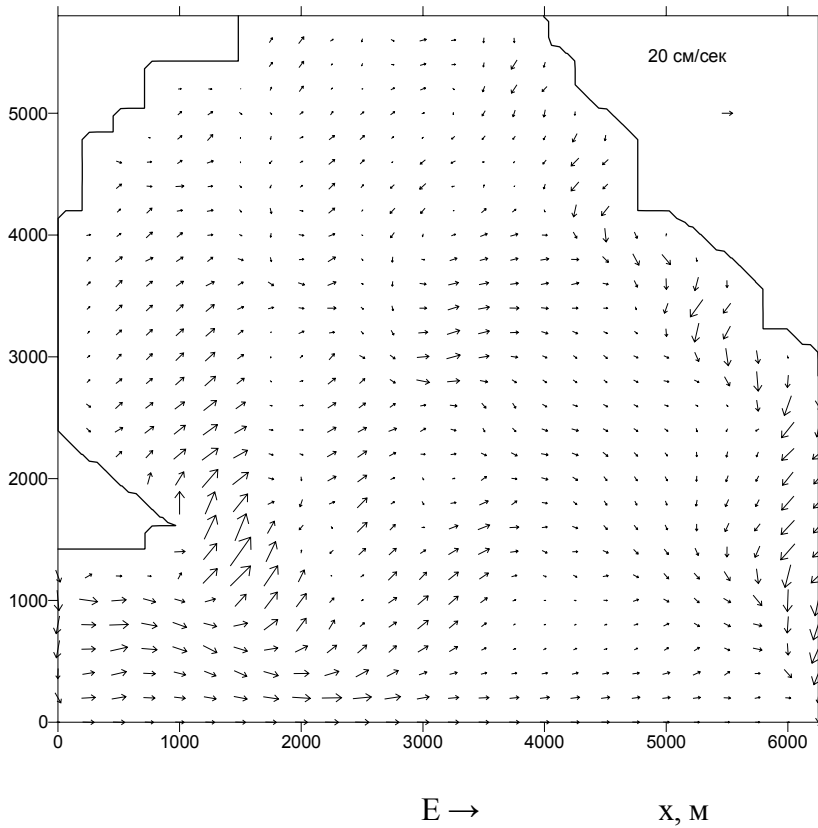


Рис.9 – Пространственное поле ветро-волновых течений (в см/с) на акватории Керченской бухты при южном ветре силой 8 м/с.

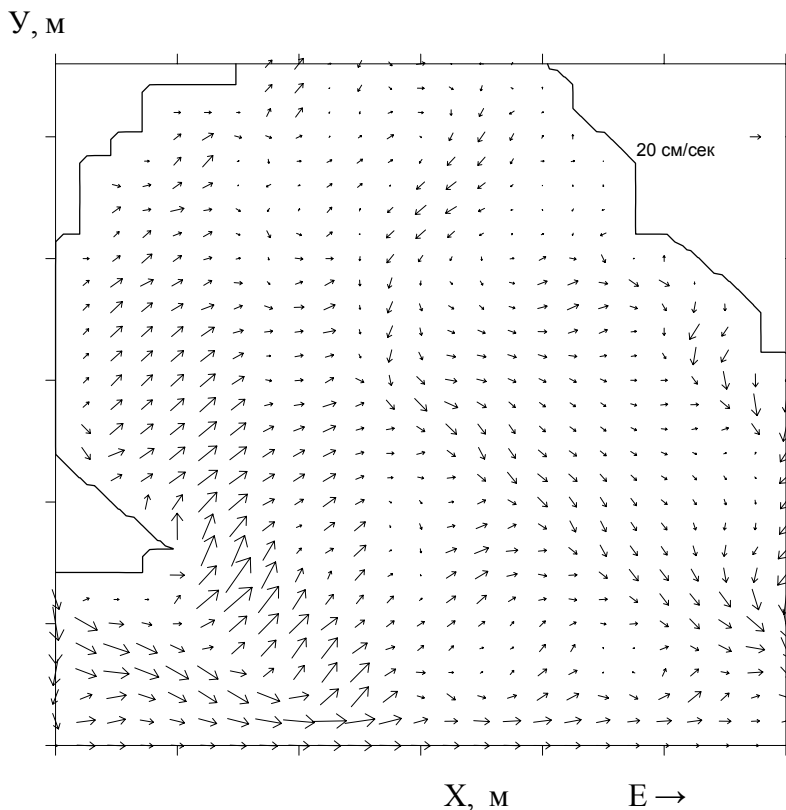


Рис.10 – Пространственное поле ветро-волновых течений (в см/с) на акватории Керченской бухты при южном ветре силой 14 м/с.

формированию индуцируемой поверхностным волнением системы течений в районе его расположения. Течения возникают как результат процессов диссипации энергии и потери импульса в волнах и проявляются на фоне орбитальных движений частиц воды.

Скорости ветро-волновых течений, рассчитанные с учетом волновой составляющей, показывают у мыса Белый большие значения - до 75 см/с, - чем в модельных расчетах [3] дрейфово-градиентных течений. Общее направление переноса в западной части бухты – на северо-восток. В центральной и восточной части бухты общее направление переноса в водном потоке - на юго-восток. Таким образом, течение огибает бухту по часовой стрелке, создавая при черноморском потоке вод антициклональную циркуляцию.

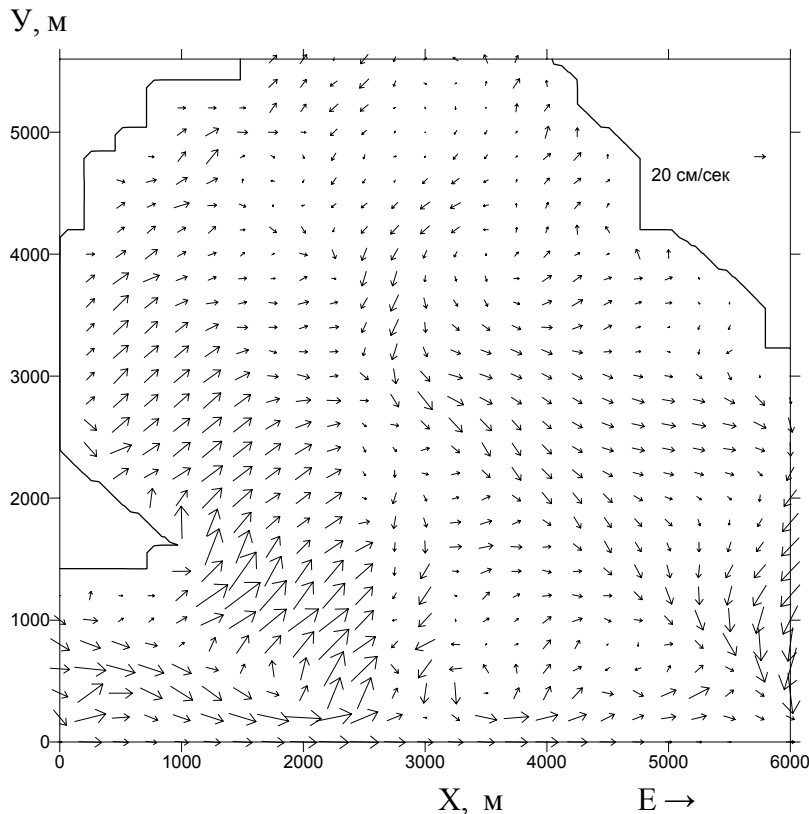


Рис.11 – Пространственное поле ветро-волновых течений (в см/с) на акватории Керченской бухты при южном ветре силой 20 м/с.

Выводы. Рассчитанные поля волнения в прибрежной зоне характеризуются значительной пространственной неоднородностью, обусловленной влиянием рельефа дна, судоходного канала, эффектами рефракции, сходимостью волн на мысе Белый.

Концентрирование и высвобождение волновой энергии на мысе Белый приводит к тому, что при ветре южного направления скорость ветро-волнового течения, рассчитанного в данной работе с помощью комплекса моделей волнения и течений, достигает 70-75 см/с.

Согласно результатам моделирования черноморского потока, выполненного с помощью модели дрейфово-градиентных течений, также получено усиление течения в районе м. Белый, по сравнению с акваторией закрытой бухты, до 60 см/с [3].

Другая зона с повышенными значениями скоростей течений - это восточные и северо-восточные берега Керченской бухты. В ходе окончательного разрушения ветровых волн и волнового нагона здесь формируется при слабом ветре вдольбереговой поток водных масс. Средняя скорость течения в потоке составляет 20-30 см/с – при ветре 8 м/с.

Полученные поля течений согласуются с типовыми схемами циркуляции вод в Керченской бухте, основанными на эмпирических данных до и после строения тузлинской дамбы [1, 2, 11]. Использование в данном исследовании комплекса численных моделей, включающего спектральную модель волнения и учитывающего волновые течения, позволило отразить струи, огибающие берег в восточной части Керченской бухты, т.е. вдольбереговые течения, а также общее направление переноса на юго-восток – в восточной части бухты, на север и северо-восток – в ее западной части. Скорости течения в бухте при южном ветре силой 14 м/с составляют 5-20 см/с, что также, как и направление, согласуется с инструментальными и спутниковыми измерениями [2].

Список литературы

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Черное море. Гидрометеорологические условия / [Симонов А.И., Альтман Э.Н., Ворник В.Н. и др.] – С.-П.: Гидрометеиздат, 1991. – Т. IV, Вып.1. – 429 с.
2. Ломакин П.Д. Характеристика современного состояния системы течений в Керченском проливе на базе спутниковых и контактных наблюдений / Ломакин П.Д., Боровская Р.В. // Исследования земли из Космоса. – 2006. - №6. – С. 65-71.
3. Фомин В.В. Совместное моделирование течений и волнения в Керченском проливе/ Фомин В.В. // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – 5. – С. 3-13.
4. Моделирование динамики вод в Керченском проливе и предпроливных зонах / под ред. Иванова В.А. - Севастополь, 2010 – 206 с.
5. Просторово-часова мінливість деформацій морського дна в Керченській затоці та протоці: звіт НДР(пром.ж.), під кер. Ілюшина В.Я. / ОДЕКУ. – Одесса, 2011. – 157 с.
6. Тучковенко Ю.С. Комплексное моделирование динамики вод в прибрежной зоне моря при различных ветро-волновых условиях / Тучковенко Ю.С., Сахненко О.И. // Український гідрометеорологічний журнал. –2008. - №3 – С.202-213.
7. SWAN Cycle IV, Version 40.31: user manual. - Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Netherlands, 2004. – 110 p.
8. Сахненко О.И. Численная модель литодинамики прибрежных морских акваторий с учетом берегозащитных сооружений / Сахненко О.И., Тучковенко Ю.С. // Экология городов и рекреационных зон. – Одесса. –2009. – С.129-133.
9. Океанографические таблицы/ [ред. Мироненко З.И.] – С.-П.:Гидрометеиздат, 1975. – С.234-236.
10. Абузьяров З.К. Морское волнение и его прогнозирование / Абузьяров З.К. – Гидрометеиздат, 1981. – 165 с.
11. Адобовский В.В. Водообмен бассейнов системы берегозащитных сооружений/ Адобовский В.В., Большаков В.Н. // Проблемы литодинамики и экосистем Азовского моря и Керченского пролива: мат. междунар. науч.-практ. конф., 8-9 июля 2004г., Ростов н.Д, 2004. – С.6-8.

Результати комплексного моделювання вітрового хвилювання та вітро-хвильової циркуляції вод в Керченській бухті при чорноморському потоці крізь протоку. О.І. Сахненко

Виконано комплексне моделювання вітрового хвилювання та вітро-хвильових течій в Керченській протоці при південному напрямку вітру, що генерує чорноморський потік вод крізь протоку.

Ключові слова: Керченська бухта, вітро-хвильова циркуляція вод.

The results of complex modeling of the wind waves and wind-wave circulation. on the Kerch bay under the Black sea flux through the Kerch spiling. O. Sakhnenko

Under consider of the wave radiation stresses the complex modeling of the waves and wind-wave currents was released for the Kerch bay under the southern wind direction.

Keywords: the Kerch bay, the wave-wind circulation.