

УДК 551.466.3

**Ю.С. Тучковенко, д.г.н., О.И Сахненко, асп.**  
*Одесский государственный экологический университет*

## **КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОД В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ УСЛОВИЯХ**

*Используя спектральную модель трансформации ветрового волнения и гидродинамическую модель для расчета ветро-волновых течений, исследованы особенности циркуляции вод и получены оценки водообновления в прибрежных акваториях г.Одессы при различных конструкциях берегозащитных сооружений.*

**Ключевые слова:** ветро-волновая циркуляция вод, прибрежная зона г.Одессы

**Введение.** Прибрежная зона г.Одессы является уникальной природной экосистемой, центром оздоровления, отдыха и туризма. Изучение особенностей динамики вод прибрежной акватории, с учетом существующих берегозащитных сооружений, необходимо для выбора оптимальных путей решения экологических проблем этой зоны, среди которых наиболее актуальными являются:

- распреснение дренажными, хозяйственными, бытовыми и прочими стоками. Согласно [1], 11 выпусков дренажных вод сбрасывают в море около 50-60 тыс. м<sup>3</sup> воды в сутки. Из них только 3% уходит в море за линию волноломов, а остальной объем первоначально поступает в бассейны;
- накопление загрязняющих веществ, поступающих с ливневыми, дренажными стоками, а также сбросами с прилегающих социально-бытовых объектов;
- гибель морских гидробионтов и снижение биофильтрационного потенциала побережья в результате избыточного распреснения и застойных явлений в ограниченных волноломами «ковшах» пляжей;
- разрушение береговой полосы в результате ветро-волнового воздействия, транспортировки и перераспределения донного материала.

Для адекватного расчета течений в прибрежной зоне при наличии берегозащитных сооружений, таких как подводный волнолом, было предложено использовать комплекс математических моделей трансформации ветрового волнения и ветро-волновой циркуляции вод [2]. Используя схемы течений, рассчитанные для акватории типового одесского пляжа в случае распространяющихся к берегу ветровых волн со средней высотой 1,1 м, а также при условии их отсутствия, был продемонстрирован доминирующий вклад ветрового волнения в формирование прибрежной циркуляции вод у побережья г. Одессы. Учитывая, что в Одесском заливе преобладает волнение высотой до 0,5 м, представляет интерес расчет течений на акватории пляжа в условиях слабых ветров.

Цель данной работы заключается в изложении результатов моделирования ветро-волновой циркуляции вод и оценок времени обновления вод бассейна типового одесского пляжа, изолированного от моря затопленным волноломом, при различных гидрометеорологических условиях и конструкциях волнолома.

**Особенности водообмена прибрежного мелководья у побережья г. Одессы с открытым морем.** Экологическая обстановка на акваториях прибрежных бассейнов во многом определяется характером и интенсивностью водообмена с открытым морем. Если ранжировать по степени важности существующие и вновь возникающие факторы,

наиболее важным по степени влияния на экологическое состояние прибрежной морской экосистемы является комплекс берегозащитных сооружений. Как известно, протяженность сплошной линии гидротехнических сооружений в прибрежной зоне города Одессы, включая порт, составляет около 20 км. Из них система противооползневых сооружений (ПОС) Одессы занимает около 14 км. По характеру водообмена все бассейны делят на три группы [3]:

- свободного водообмена – бассейны без волноломов, разделенные бунами и траверсами;
- ограниченного – бассейны, отделенные от открытого моря подводными волноломами;
- затрудненного – бассейны-гавани, имеющие узкий вход в акваторию и закрытые от волнения незатопленными волноломами.

Из 56 бассейнов, входящих в ПОС, 35 бассейнов общей площадью 1,1 км. кв. отделены от открытого моря волноломами высокого и низкого уровней. Остальные бассейны разделены траверсами и бунами, имеют свободный водообмен, но в тоже время, подвержены разрушающему воздействию ветровых волн [4].

Динамика вод в прибрежной зоне моря определяется тремя составляющими: волновыми течениями, возникающими под действием трансформирующихся и разрушающихся волн, дрейфовыми и градиентными ветровыми течениями. В результате взаимодействия названных факторов, а также в условиях искусственного ограждения, на акваториях бассейнов, отделенных от моря волноломами, может возникать сложная циркуляция вод. Основным фактором, обеспечивающим перемешивание водных масс и водообмен «ковшей» пляжей с морем, является ветровое волнение [2]. В районе Одессы повторяемость ветрового волнения высотой более 0,5 м в среднем за летний период составляет 17% согласно данным наблюдений, выполненным Геофизической лабораторией Одесского государственного университета (ГФЛ ОГЭКУ) с 1951 по 2003 гг. В отдельные годы эта цифра может снижаться до 2%. Повторяемость штормового волнения в среднем за год составляет 9,6 %. Структура волнения у побережья Одессы характерна тем, что в зоне прибрежных акваторий не наблюдаются штормовые волны северо-западного, западного и юго-западного направлений.

**Материалы и методы исследования.** Для полноты описания гидродинамических процессов, обуславливающих водообмен в прибрежной зоне моря, использовались два вида моделей: эволюции параметров ветрового волнения и ветро-волновой динамики вод на мелководье. Речь идет о комплексе математических моделей, каждая из которых решает свою частную задачу, но в целом эти модели позволяют достигнуть конечный результат за счет того, что гидродинамическая модель использует в качестве исходной информации результаты, полученные с помощью модели трансформации волнения.

В гидродинамической модели ветро-волновая циркуляция вод в прибрежной зоне моря описывается с помощью осредненных по глубине и периоду ветровых волн уравнений Рейнольдса [5]:

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) - \\ - \frac{1}{\rho h} (\tau_{wy} - \tau_{0y}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + f_0 U = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где оси  $x$  и  $y$  направлены, соответственно, во вдольбереговом и поперечном направлениях;  $t$  - время;  $U$  и  $V$  – осредненные по глубине компоненты вектора скорости течения по осям  $x$  и  $y$ , соответственно;  $\xi$  - возмущение уровня свободной водной 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 вектора тангенциальных напряжений ветра на свободной поверхности,  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$  - поперечная компонента тензора турбулентных напряжений потока;

$\tau_{0x}$ ,  $\tau_{0y}$  - компоненты вектора тангенциальных напряжений потока у дна, представленные в соответствии с [6].

$S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  – компоненты волновых радиационных напряжений, определяемые следующим образом [7]:

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

где  $n = \frac{1}{2} + \frac{K h_0}{sh 2K h_0}$ ,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;

$\lambda$ ,  $h_b$ ,  $\alpha$  - длина, высота и угол подхода ветровых волн к берегу, соответственно.

В работе [2] было показано, что в прибрежной зоне г.Одессы преобладают энергетические течения, которые возникают за счет обрушения ветровых волн. На акваториях с ограниченным водообменом одной из областей интенсивного разрушения ветрового волнения является волнолом. Для адекватного описания процессов, протекающих в зоне волнолома, трансформация параметров ветрового волнения предварительно рассчитывалась с помощью спектральной модели SWAN [8], в которой учитывается влияние волнолома на распространение ветровых волн. При этом волнолом рассматривался как препятствие подсеточного масштаба.

Пространственные поля высоты, длины, периода ветровых волн и направления их подхода к берегу, полученные по модели SWAN при различных ветровых условиях и конструкциях волнолома, наряду с глубинами в узлах расчетной сетки, являлись главной исходной информацией для расчета прибрежной циркуляции вод на акватории рассматриваемого пляжа.

Численные методы решения исходных уравнений (1-3) приводятся в [9]. На жидких границах задавались составляющие вектора скорости течений, рассчитанные на

крупномасштабної сітці і відповідуючі заданій силі вітру. На твердій границі приймався умову  $U = V = 0$ . В ході чисельних експериментів вирішувалась задача пристосування поля течій до особливостей топографії дна і стаціонарним крайовим умовам. Розрахунки проводились до встановлення поля течій. Час встановлення циркуляції вод визначалося шляхом вирахування на кожному часовому кроці кінетическої енергії поля течій. Поле течій вважали установившимся, якщо його кінетическа енергія суттєво не змінювалася з течією часу.

Моделювання вітро-хвильової динаміки вод виконувалося в межах обмеженої хвильовою прибрежної акваторії типового одеського пляжа площею 20,4 тис. м<sup>2</sup>, середньої глибиною 1,6 м. і максимальними глибинами, не перевищуючими 2- 2,5 м.

Розрахунки проводились на прямокутній сітці з просторовими кроками  $\Delta x = \Delta y = 15$  м. Оси  $x$  і  $y$  направлені на південь і схід відповідно. Крок по часу приймався рівним 0,1 с.

Розрахунки полів течій проводились для східного вітру силою 5, 8 і 14 м/с і підході генеруємих вітром хвиль по нормалі до берега. Параметри установившогося вітрового хвилювання на відкритій морській границі акваторії при різних швидкостях вітру, отримані з допомогою [10], приведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Параметри установившогося вітрового хвилювання на відкритій морській границі акваторії при різних швидкостях вітру

Швидкість вітру $w$ , м/с	5	8	14
Середня висота $\bar{h}$ , м	0,4	0,6	1,1
Середній період $\bar{\tau}$ , с	3,2	3,6	4,7

Розглядалися випадки наявності і відсутності підводного хвильовою, а також берегозахисні конструкції в формі хвильовою з 10-метровими отворами.

Час водооновлення розраховувалося як відношення об'єму басейна  $W$  до кількості води, яке з розрахованою швидкістю могло поступати в басейн через лінію хвильовою в одиницю часу  $Q$

$$T = \frac{W}{Q}. \quad (5)$$

**Аналіз результатів.** На рис. 1-3 представлені схеми течій, сформовані в результаті спільного впливу вітру силою 5, 8 і 14 м/с і генеруємого їм вітрового хвилювання при існуючих берегових інженерних спорудах і різних варіантах їх реконструкції.

При вільному водообміні, коли стіна хвильовою відсутня, в прибрежній області формується інтенсивна циркуляція, для якої характерно наявність вихревих образів протилежного знака завихреності. Розташування круговоротів визначається не тільки неоднорідностями донного рельєфу, але і залежить від конкретних вітро-хвильових параметрів. При слабкому вітрі силою 5 м/с формуються дві циркуляційні комірки, які примикають до мола в південній і північній частинах басейна. З збільшенням швидкості вітру від 5 до 14 м/с утворюється циркуляційна комірка в центральній частині прибрежного басейна. Швидкості течій на периферії круговоротів становлять в середньому 15-20 см/с при слабкому вітрі і 40-50 см/с - при штормових умовах. Від периферії до центральної частини круговоротів значення швидкостей течій різко зменшуються.

Интенсивная циркуляция вод на всей прибрежной акватории, не защищенной волноломом, обусловлена высвобождением энергии волн при их постепенном разрушении по мере подхода к берегу [11].

В условиях ограниченного водообмена, т.е. при наличии сплошной стенки волнолома, циркуляция выражена слабее, чем при свободном водообмене прибрежных бассейнов с морем. Циркуляционные ячейки выражены слабо, скорости течения на участке от волнолома до узкой прибрежной полосы в среднем на 5-25 см/с меньше, чем в случае без волнолома. В то же время отмечаются две области повышенных скоростей течений, соответствующие двум основным участкам обрушения ветровых волн. Интенсивное обрушение ветровых волн на волноломе приводит к 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. В системе циркуляции присутствуют разрывные течения, которые имеют вид отходящих от берега узких струй шириной всего несколько десятков метров, отстоящих друг от друга на расстояние от десятков до сотен метров. Скорости разрывных течений составляют от 0,35 м/с до 1,0 м/с при ветрах силой от 5 до 14 м/с, соответственно (рис. 1а-3а).

При подходе волн по нормали к берегу на линии волнолома отмечается увеличение нормальной к берегу составляющей скорости течения по сравнению с вариантом, когда волнолом отсутствует.

Другая зона с повышенными значениями скоростей течений - это узкая полоса прибоа (береговая отмель). В ходе окончательного разрушения ветровых волн и волнового нагона здесь формируется мощный вдольбереговой поток водных масс. Средняя скорость течения в потоке составляет 50-65 см/с при ветре силой 14 м/с, и 20-30 см/с - при ветре 8 м/с.

Скорости течений, полученные при модельных расчетах ветро-волновой динамики вод на мелководье, были использованы для оценки водообновления пляжных бассейнов с различной степенью изолированности от моря. При ветре силой 5 м/с и волнении со средней высотой волны около 0,4 м, распространяющемся по нормали к берегу, время водообновления в бассейне с затопленным волноломом, рассчитанное по формуле (5), составляет около 80 мин. Этот результат согласуется с оценками, сделанными в работе [4] на основе измерений скорости течений. По результатам измерений при различных направлениях ветра и волнении, не превышавшем 0,5 м, период водообновления в прибрежных бассейнах г.Одессы составлял несколько часов. Максимальный период водообновления, равный 6 ч, был зафиксирован в бассейне гавани с незатопленным волноломом и шириной входа в акваторию 14 м.

В летний период, когда гидродинамическая активность водных масс снижается, а антропогенный пресс усиливается, экологическая ситуация в прибрежных акваториях может осложняться. При характерной для этого периода синоптической ситуации - слабом ветре и волнении высотой до 0,5 м, - интенсивный прогрев верхнего слоя воды может приводить к формированию устойчивой вертикальной стратификации. Водообмен происходит в основном в поверхностном слое, ограниченном волноломом, не затрагивая всей толщи воды. В летний период при продолжительном отсутствии штормового волнения это может приводить к застойным явлениям в «ковшах» пляжей.

Обострение экологической ситуации может вызываться ливневыми стоками, сбросом в море хозяйственно- бытовых стоков, несанкционированным подключением к коллекторам, отводящим дренажные и ливневые воды в море. Поскольку системы отведения их за линию волноломов с течением времени разрушились, большая часть

этих стоков попадает непосредственно на акваторию бассейнов. При наличии в прибрежной зоне источников поступления загрязняющих веществ, время самоочищения вод акватории до некоторых фоновых значений, характерных для ее мористой части, за счет гидродинамического разбавления загрязненных прибрежных вод чистыми морскими, может существенно превышать период водообновления.

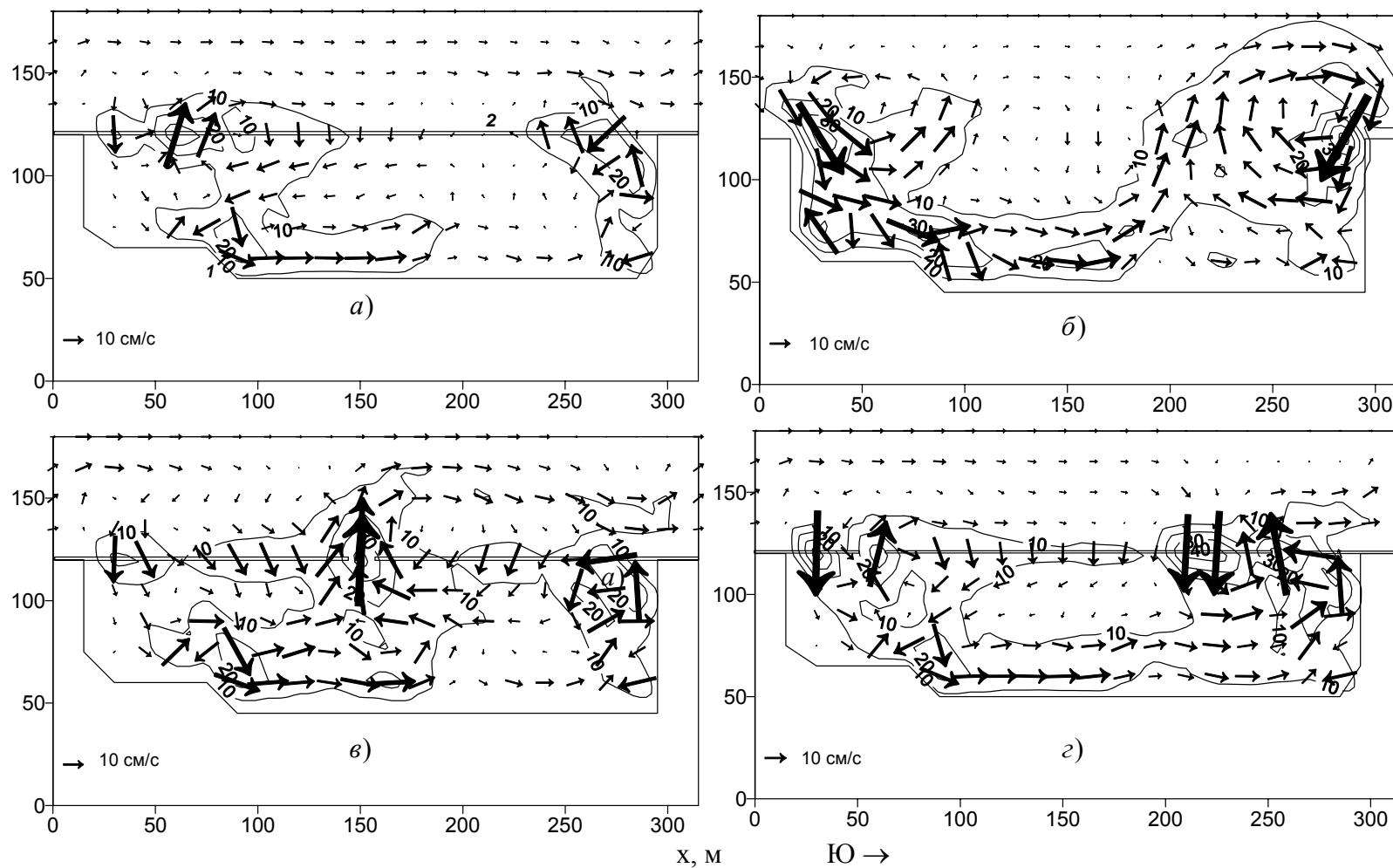
Расчеты ветро-волновой циркуляции вод и времени водообновления в огражденном волноломом бассейне показали, что наличие в волноломе даже одного отверстия шириной 10 м может привести к существенному увеличению расходов воды через линию волнолома. В этом случае создаются условия для генерации разрывных течений одним из наиболее общих наблюдаемых в природе механизмов – флуктуациями высот волн, обусловленными поперечными по отношению к изобатам вариациями рельефа дна. В районе отверстия отчетливо прослеживается направленное в сторону моря разрывное струйное течение (рис. 1в-3в).

С дополнительным поступлением морской воды в акваторию «ковша» пляжа ожидается увеличение скоростей течений не только непосредственно на линии волнолома и в районе его расположения, но и на большей части акватории. При слабом ветре и волнении со средней высотой 0.4 м наличие такого отверстия сократит время водообновления в 1,7 раза. С увеличением скорости ветра до 14 м/с и средней высоты волнения до 1,1 м разница во времени водообновления при сплошной стенке волнолома и волноломе с отверстием постепенно уменьшается, но составляет не менее 50 %. Повышение динамической активности вод будет способствовать ликвидации застойных зон, образующихся в летний период в условиях слабых ветров.

При наличии двух отверстий в волноломе длиной 10 м каждое (рис. 1г-3г) время водообновления, согласно модельным расчетам, уменьшается в 2-2,5 раза по сравнению со случаем сплошной стенки волнолома, составляя 30, 20 и 11 мин при ветре 5, 8 и 14 м/с, соответственно. В то же время, наличие в волноломе отверстий указанной ширины не приведет к существенным изменениям поля ветрового волнения и процессов диссипации волновой энергии, а значит, практически не повлияет на транспорт донного материала [11].

Одной из особенностей циркуляции при таком варианте реконструкции волнолома является локализация динамических процессов в районе отверстий. Непосредственно в районе их расположения наблюдается образование циркуляционных систем (рис. 1г-3г), которые представляют собой вихревые пары (антициклон-циклон), разделенные струей разрывного течения. Полученная структура горизонтальной циркуляции в разрывном течении согласуется с лабораторными тестами и результатами численного моделирования Халлера, Свенсена и Хааса, где также были выявлены системы циркуляционных ячеек [12].

Следует отметить, что характер ветро-волнового переноса вод зависит как от числа планируемых отверстий, так и от выбора их местоположения, которое определяется морфологическими особенностями акватории (батиметрией, конфигурацией береговой черты). При планировании отверстий в вертикальной стенке волнолома желательно учитывать особенности циркуляции вод, обусловленные морфологическими особенностями акватории и характерными ветро-волновыми условиями.



- 1- линия берегового уреза при невозмущенном уровне свободной водной поверхности;
- 2- линия волнолома.

Рис.1 - Расчетное поле изотак, см/с и векторов течений, формирующихся на акватории типового одесского пляжа под действием восточного ветра силой 5 м/с и ветрового волнения при наличии волнолома (а), его отсутствии (б), волноломе с одним (в) и двумя (г) отверстиями.

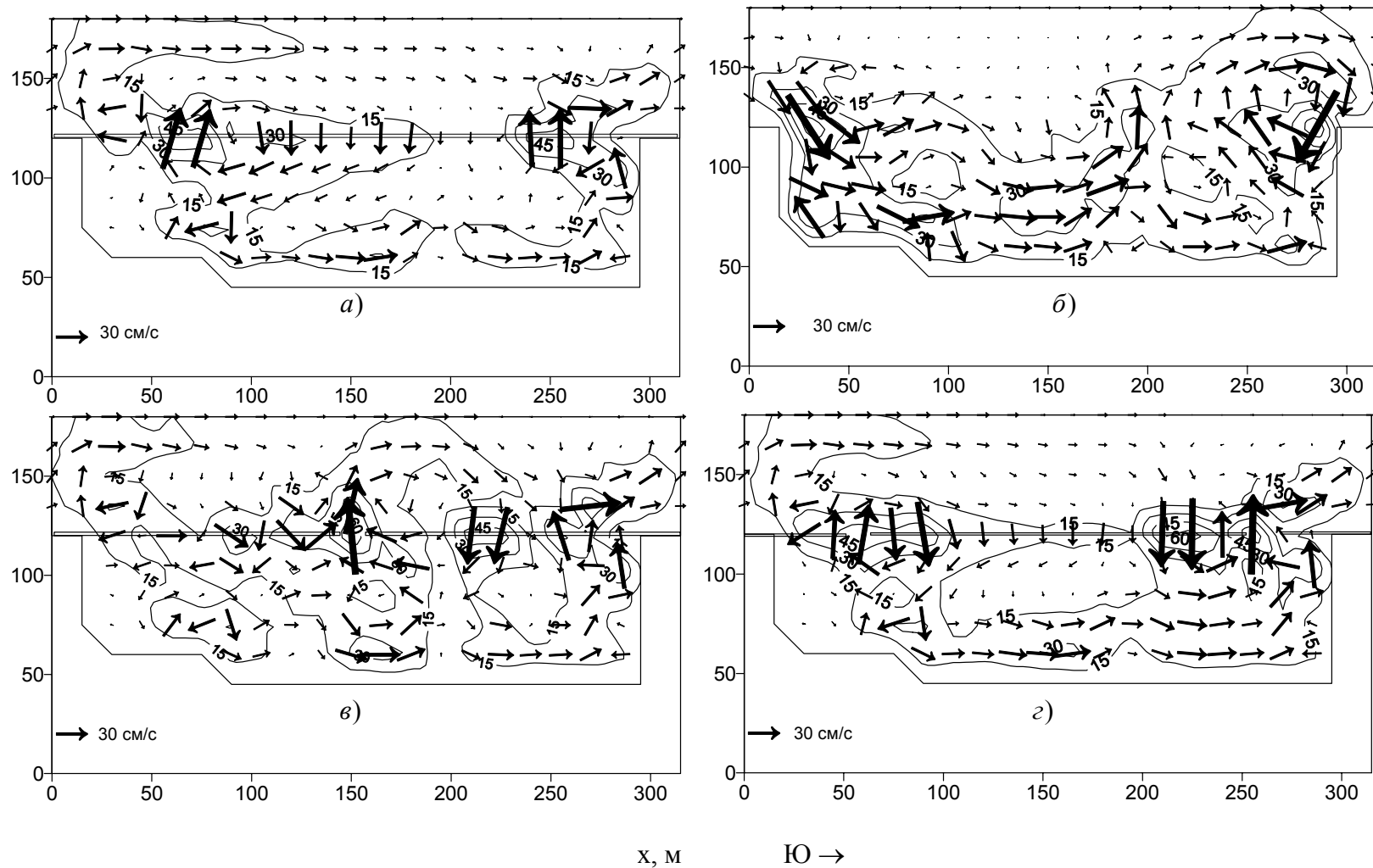


Рис. 2 - Расчетное поле изотех, см/с и векторов течений, формирующихся на акватории типового одесского пляжа под действием восточного ветра силой 8 м/с и ветрового волнения при наличии волнолома (а), его отсутствии (б), волноломе с одним (в) и двумя (г) отверстиями.



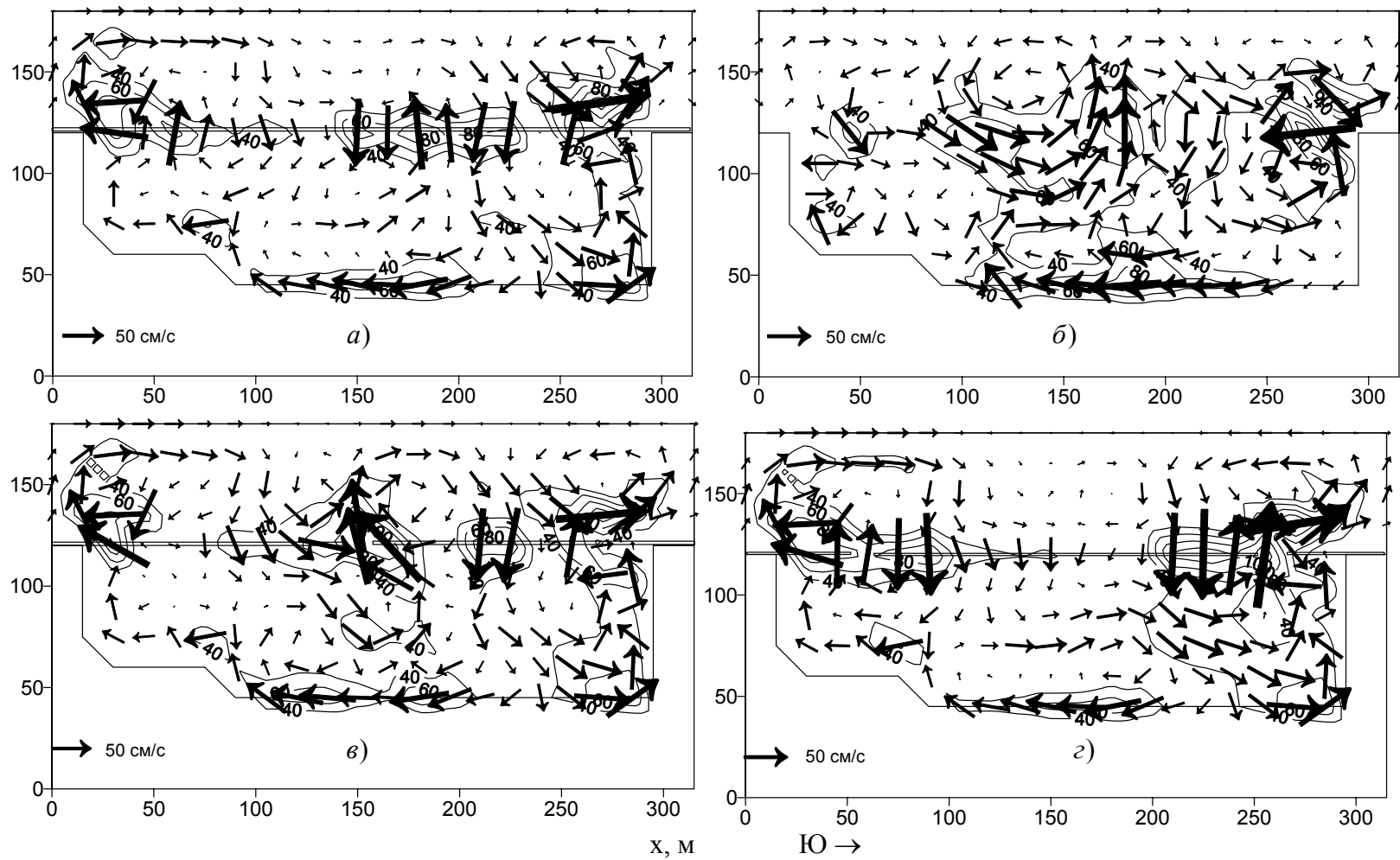


Рис. 3 - Расчетное поле изотех, см/с и векторов течений, формирующихся на акватории типового одесского пляжа под действием восточного ветра силой 14 м/с и ветрового волнения при наличии волнолома (а), его отсутствии (б), волноломе с одним (в) и двумя (г) отверстиями.

**Выводы.** Модельные расчеты показали, что характерной особенностью динамики вод в прибрежной акватории типового одесского пляжа в условиях свободного водообмена является наличие ярко выраженных циркуляционных ячеек с противоположными знаками завихренности. Совокупность этих круговоротов, разделенных разрывными течениями, охватывает большую часть акватории.

Разрывные течения сосредоточены также в таких зонах интенсивной трансформации и разрушения ветрового волнения, как подводный волнолом. Средняя по глубине скорость на линии волнолома может достигать 1м/с в направлении распространения ветровых волн. Повышенные значениями скоростей течений характерны также для узкой прибрежной полосы – береговой отмели, где формируется мощный вдольбереговой поток водных масс. В то же время, согласно расчетам для бассейна с ограниченным водообменом, на участке между волноломом и береговой отмелью течения имеют меньшую скорость, чем в бассейнах свободного водообмена.

Согласно модельным расчетам, при сооружении в стенке волнолома двух 10-метровых отверстий период водообновления уменьшится в 2-2,5 раза. При слабых ветрах, что характерно для летнего периода, наличие в волноломе одного отверстия шириной 10 м приведет к уменьшению времени водообновления в 1,7 раза, будет способствовать повышению динамической активности вод акватории и ликвидации застойных зон. Таким образом, даже одно отверстие, расположенное на участке волнолома с изначально малой скоростью течения, может существенно повысить интенсивность водообмена прибрежного бассейна с морем. Следует отметить формирование замкнутых и полужамкнутых вихревых структур в районе отверстий в волноломе.

Оценки времени водообновления, сделанные по результатам модельных расчетов пространственных полей течений, согласуются с полученными ранее по данным измерений при слабых ветрах и свидетельствуют об адекватности описания ветро-волновой динамики представленным комплексом моделей трансформации волнения и ветро-волновой циркуляции вод. Приведенный комплекс моделей позволяет описывать динамику волн и течений на прибрежном мелководье и береговой отмели, включая такие зоны интенсивного обрушения ветровых волн, как подводный волнолом, и адаптирован к условиям побережья г. Одессы.

При строительстве берегозащитных сооружений на незащищенных от воздействия ветровых волн участках прибрежной акватории, а также при реконструкции уже существующих волноломов в бассейнах с застойными явлениями и избыточным распреснением целесообразно чередование стенок волноломов с открытыми участками относительно малой ширины.

### Список литературы

1. *Северо-западная часть Черного моря: биология и экология*// под ред.Ю.П. Зайцев, Б.Г. Александров, Г.Г Миничева. – Одесский филиал института биологии южных морей, Киев, Наук. Думка. – 2006, С.52-59.
2. *Тучковенко Ю. С., Сахненко О. И.* Моделирование гидродинамических процессов в мелководной прибрежной зоне г.Одессы // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – Одеса: ОДЕКУ. - 2008.- вып.50, ч.2. – С.233-239.
3. *Адобовский В.В.* Современное состояние и некоторые экологические проблемы акваторий системы берегозащитных сооружений Одессы// Устойчивое развитие туризма на Черноморском побережье. – Одесса: ОЦНТЭИ, 2001. – С.344-352.

4. Адобовский В.В., Большаков В.Н. Водообмен бассейнов системы берегозащитных сооружений// Проблемы литодинамики и экосистем Азовского моря и Керченского пролива: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. 8-9 июля 2004г., Ростов н.Д, 2004. – С.6-8.
5. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.- Киев: Наукова Думка, Морской гидрофизический ин-т НАН Украины, 1992.- 242 с.
6. Михинов А.Е. Транспортирующая и эрозионно-аккумулятивная способность волновых потоков в береговой зоне открытых водоемов//Управление водн. ресурсами суши: теория и практика.– М.: Наука, 1989. – С. 136– 145.
7. Krishna Kumar, C S Murty Wave-induced nearshore circulation along the Calangute-Candolim beach, Goa, west coast of India.- Proc. Indian Acad. Sci., Vol.98, No. 3, 1989, P. 265-278.
8. SWAN. User manual / Delft University of Technology. Department of Civil Engineering. – Cycle IV, Version 40.31, 2004. – 110 p.
9. Лонин С.А., Тучковенко Ю.С. Имитация сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 1999.–С. 58-66.
10. Океанографические таблицы/ Под ред. Мироненко З.И. – С.-П.:Гидрометеиздат, 1975. – С.234-236.
11. Тучковенко Ю. С., Сахненко О. И. Моделирование трансформации ветровых волн в прибрежной зоне моря при различных вариантах реконструкции волнолома //Український гідрометеорологічний журнал. –Одеса: ТЕС, ОДЕКУ. – 2007. - №2. – С. 175 - 185.
12. Haas K.A., Svendsen I.A., Haller M.C., Zhao Q. Quasi three-dimensional modeling of rip current systems // J.Geophys. Res. – 2003. – Vol.108 – N.C7 – P. 3217-3238.

**Комплексне моделювання динаміки вод в прибережній зоні моря за різними вітро-хвильовими умовами.**

**Тучковенко Ю.С., Сахненко О.И.**

*Використовуючи спектральну модель трансформації вітрового хвилювання та гідродинамічну модель для розрахунку вітро-хвильових течій, досліджені особливості циркуляції вод та отримані оцінки водооновлення в прибережних акваторіях м.Одеси за різними конструкціями берегозахисних споруд.*

**Ключові слова:** вітро-хвильової циркуляції вод, прибережна зона м.Одеси.

**The modeling of the water dynamic on the beach zone under the different wave-wind conditions.**

**Y.S. Tuchkovenko, O.I. Sakhnenko**

*The water circulation on the Odessa's beach zone was investigated and the water-changing time was estimated under the different configurations of the shielding constructions. The complex of the wave-wind circulation numerical model and the wave transformation spectral model was used.*

**Keywords :** The wave-wind water circulation, Odessa's beach zone.