

УДК 551.435.36+551.468.1 (262.5)

**Ю.Н. Горячкин**, д-р геогр. наук, ст. научн. сотр.

**В.В. Фомин**, д-р физ.-мат. наук, вед. научн. сотр.

**Л.В. Харитоновна**, вед. инженер,

Морской гидрофизич. институт НАН Украины,

2, ул. Капитанская, Севастополь-11, 99011,

Украина

тел. 095 685-17-64

yngor@yandex.ua, lukharitonova@rambler.ru

## **ДИНАМИКА НАНОСОВ В ЕВПАТОРИЙСКОЙ БУХТЕ, ЧЕРНОЕ МОРЕ**

Рассмотрены результаты математического моделирование ветрового волнения, ветро-волновых течений и трасс движения наносов для района Евпаторийской бухты и прилегающей акватории. Показаны различия в их характеристиках в ситуации до строительства мола в порту в 1979 г. и после. Использована спектральная модель SWAN.

**Ключевые слова** математическое моделирование, ветровое волнение, течения, поток наносов, побережье Евпатории.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Евпаторийское побережье — это курортно-рекреационная зона общегосударственного значения. Основой развития курорта Евпатория в XX веке являлись два фактора: наличие лечебных грязей и рапы в озере Майнакском, а также знаменитых песчаных пляжей. В сочетании с мелководным рельефом подводного склона это создавало идеальные условия для существования детского курорта. В настоящее время первый фактор фактически утрачен (озеро Майнаки потеряло свое лечебное значение), а песчаные пляжи резко деградировали. Деградация пляжей выразилась в отступании береговой линии (в отдельных районах до 30 м за 20 лет) и сокращении общей площади пляжей (по нашим данным только за период с 1986 по 2009 гг. в черте города на 100 000 м<sup>2</sup> [2]; в исчезновении в ряде районов песка с пляжей и в вскрытии подстилающих глинистых отложений, а также в резком увеличении в составе пляжевого материала обломков известняка различной степени окатанности. Следовательно, данная статья характеризуется актуальностью.

Деградация береговой зоны значительно ухудшила рекреационную привлекательность курорта, что вызывает обоснованную тревогу у городской администрации и руководителей здравниц.

В работе [2] нами подробно проанализированы исторические изменения береговой линии в районе Евпатории и показаны основные причины деградации пляжей. Согласно нашим выводам, наибольшее влияние на изменчивость береговой линии Евпатории оказало гидротехническое строительство. Как показывают исторические снимки, изначально, в XIX веке в центральной части города располагался значительный по ширине пляж. Штормовые нагоны создавали определенные проблемы, поэтому в начале XX века в центре города было построено берегоукрепительное сооружение в виде наклонной стенки. Дальнейшая динамика пляжей в этом районе города была обречена, т.к. зависела от наличия или

отсутствия этой стенки, которая периодически разрушалась и восстанавливалась. Наиболее масштабная реконструкция набережной в центре города была осуществлена в 1968 – 1972 гг. При этом она приняла вид вертикальной бетонной стенки с волноотбойным эффектом на протяжении 1,8 км, после чего пляжи в центре города полностью исчезли. Это оказало существенное влияние на количество пляжевых наносов в районе Евпатории.

В конце 70-х гг. XX века на Карантинном мысе было осуществлено строительство мола длиной 200 м, который представляет собой монолитное бетонное сооружение. Почти 70 м его оконечности построено на сваях и является полупропускным. Существовавшая ранее миграция наносов изменилась, и с восточной стороны мола образовалась обширная отмель. Для поддержания постоянной глубины 5,4 м вдоль мола стали производиться дноуглубительные работы, причем изымаемый материал сбрасывался в море в районе пересыпи оз. Сасык, исходя из предположения, что поток наносов направлен от юго-востока. После этого к западу от портового мола береговая линия начала отступать. В настоящее время пляжи этого района города являются наиболее проблемными. Городские власти неоднократно инициировали проведение исследований с целью создания и реализации проектов восстановления пляжей. Однако, из-за отсутствия финансирования этот вопрос до сих пор не решен.

Как видим, актуальность этой работы связана с тем, что в настоящее время существует очередной проект углубления акватории Евпаторийского порта до абсолютной отметки  $-7,2$  м с объемом выемки и перемещения грунта, равной  $\approx 300\,000$  м<sup>3</sup>. В отличие от предыдущих случаев, у проектировщиков есть понимание, что выбор места перемещения выбранного со дна материала важен для сохранения пляжей. При этом знание особенностей движения наносов при различных ситуациях имеет как практическое так и научное значение. Исходя из изложенного, целью данной работы является определение влияния строительства мола Евпаторийского морского торгового порта на изменения характера движения наносов в Евпаторийской бухте и прилегающей акватории.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: а) создание цифровых моделей рельефа дна с высоким пространственным разрешением на основе архивных и современных навигационных карт района; б) адаптация математической модели SWAN к конкретным условиям Евпаторийской бухты; в) проведение численного моделирование ветровых волн, волновых течений и потоков наносов для различных метеорологических ситуаций; г) оценка изменчивости указанных параметров под влиянием воздействия природных и антропогенных изменений. В итоге возможно решение важной практической задачи, что определяет практическую значимость данной работы. Можно утверждать, что выполненное численное моделирование внесло определенный вклад в развитие теории береговедения. Поэтому данная статья имеет также и теоретическое значение.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Численное моделирование выполнялось в три этапа. На первом этапе для расчета параметров ветрового волнения использовалась спектральная модель SWAN (Simulating WAVes Near shore) [5], в основе которой лежит уравнение баланса волновой энергии в спектральной форме:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha}(c_{x\alpha}N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) + \frac{\partial}{\partial \omega}(c_\omega N) = \frac{S}{\omega}, \quad (1)$$

где  $S$  – функция источника, описывающая механизмы формирования волнового поля;  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$  – горизонтальные координаты;  $t$  – время;  $\theta, \omega$  – угловая координата и собственная частота (частота, наблюдаемая в системе отсчета, движущейся со скоростью фонового течения);  $N$  – спектральная плотность волнового действия; величины  $c_{x\alpha}, c_\theta, c_\omega$  представляют собой скорости переноса волновой энергии в фазовом пространстве, которые определяются в предположении медленно меняющегося рельефа дна и медленных изменений фоновых течений на основе метода геометрической оптики;  $\alpha$  – повторяющийся индекс.

Для повышения пространственного разрешения расчеты волновых полей проводились на трех вложенных сетках. Первая из них с пространственным разрешением  $4,6 \times 4,5$  км покрывала весь Азово-Черноморский бассейн. Вторая имела разрешение  $211 \times 197$  м и охватывала западное побережье Крыма. Третья сетка с разрешением  $15 \times 15$  м включала район Евпаторийской бухты и имела 3 варианта: – до постройки мола порта; – после постройки мола порта до углубления фарватера и – после углубления фарватера. При этом использовались картографические данные о береговой линии и рельефе подводного склона моря в пределах всей бухты.

На втором этапе для района Евпаторийской бухты и порта по известным из волновой модели градиентам радиационных напряжений  $\tau_\alpha^w$  определялись установившиеся поля волновых течений, для чего применялась модифицированная система уравнений мелкой воды вида [4]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(Du_\alpha) + Au_\alpha + \varepsilon_{\alpha\beta} f Du_\beta + gD \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} = \tau_\alpha^0 - \tau_\alpha^b - \tau_\alpha^v \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha}(Du_\alpha) = 0 \quad (3)$$

где  $u_\alpha$  – осредненные по глубине горизонтальные компоненты скорости течений;  $\eta$  – уровень моря;  $A\varphi = \frac{\partial}{\partial x_\beta}(Du_\beta\varphi)$  – оператор переноса;  $\tau_\alpha^0$  – касательные напряжения трения на свободной поверхности;  $\tau_\alpha^b = C_b \sqrt{u_1^2 + u_2^2} u_\alpha$  касательные напряжения трения на дне бассейна;  $C_b$  – коэффициент придонного трения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – параметр Кориолиса;  $\varepsilon_{\alpha\beta}$  при  $\alpha = \beta$ ;  $\varepsilon_{12} = -1$ ,  $\varepsilon_{21} = 1$ . Поскольку вклад  $\tau_\alpha^w$  в формирование ветро-волновых течений является определяющим, то непосредственное влияние ветра на течения в прибрежной зоне не учитывалось ( $\tau_\alpha^0 = 0$ ).

На третьем этапе рассчитывались компоненты удельного расхода наносов ( $q_x, q_y$ ) по методике, изложенной в работе [3].

Моделирование волн, течений и потоков наносов проводились для 3-х наиболее волноопасных направлений ветра, который задавался однородным по пространству и неизменным во времени. Скорость ветра была выбрана равной 15 м/с, что соответствует значениям штормовых скоростей в исследуемом регионе. Расчеты проводились для 2-х вариантов рельефа дна: до изменения конфигурации береговой линии и постройки портовых мола в Евпатории и для современного положения морского берега.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Ветровое волнение.* Наиболее значительное волнение в Евпаторийской бухте возбуждают ветры, действующие в секторе 180–270° от юго-запада. Проведенные численные эксперименты показали, что при воздействии ветров от запада и юго-запада (III четверть) в исследуемый район приходят волны, отличающиеся по направлению всего в несколько градусов. При южном ветре направление волнения на границе исследуемой акватории совпадает с направлением ветра. Волны наибольшей высоты в бухте (до 1,5 м) формирует юго-западный ветер. По мере продвижения вглубь бухты фронт волны разворачивается, стремясь занять положение, параллельное изобатам. После строительства мола этот эффект проявляется более выражено, при этом характерно, что высота волны в бухте уменьшилась в среднем на 20-30%. Это, кстати говоря, проявилось в том факте, что после строительства мола акватория бухты стала интенсивно зарастать водорослями *Zostera marina*.

*Ветро-волновые течения.* Длительные измерения течений и волнения на оголовке мола (глубина 8 м), выполненные МГИ НАН Украины г. в 2006-2008 гг. показали, что наиболее значительное волнение наблюдается в узком секторе 160-270° [1]. Анализ временных реализаций течений показал, что в подавляющем большинстве случаев (около 97 %) скорость их не превышает 10 см/с. При малых скоростях течений какой-либо выраженной связи с локальным ветром не отмечается. Течения же со скоростью более 10 см/с действуют в двух довольно узких секторах. Один из них — юго-западный, другой — восточный, что в целом соответствует ориентации береговой линии к западу и востоку от места измерений. Сравнение со скоростью и направлением волнения показало, что моменты усиления течений соответствуют развитому волнению от южных и юго-западных направлений с высотой волны более 1,0 м на глубине 8 м. В такие моменты скорость течения возрастает до 15–20 см/с. Максимальная измеренная величина скорости течения за 3 года составила 45 см/с. Необходимо при этом отметить, что в течение наиболее сильных штормов импеллеры измерителей останавливались из-за запутывания водорослями, поэтому, вероятно, скорости максимальных течений могут быть и большими.

Результаты расчетов средних по глубине скоростей течений в Евпаторийской бухте по модели показали хорошее соответствие с описанными выше натурными измерениями. Модельные течения имеют вид вдольбереговых, со скоростями от 20 до 40 см/с. Их интенсивность и положение зависит, в первую очередь, — от угла подхода волн к касательной в данной точке береговой линии. Максимальные вдольбереговые скорости волновых течений характерны для интенсивного волнения от южных румбов и составляют 50-60 см/с. Для всех вариантов расчета к востоку от м. Карантинный образуется течение, направленное в бухту (рис. 1). При этом скорость этого течения максимальна при южных ветрах. При З и ЮЗ ветрах струя течения прижата к берегу в пределах расстояния до 100 м. Мористее образуется серия локальных циркуляций. Западнее бухты при действии тех же направлений ветра образуются течения, направленные к м. Карантинный, где они конвергируют. Затем уже новое единое течение отрывается от берега, огибает Евпаторийскую бухту и движется в северо-восточном направлении к пересыпи оз. Сасык. Таким образом формируется местный циклонический круговорот, который охватывает Евпаторийскую бухту.

При Ю ветре наблюдаются течения, охватывающее гораздо большую акваторию. При этом с северо-востока в бухту направлено другое, также интенсивное течение. К западу от м. Карантинный образуются два антициклонических круговорота.

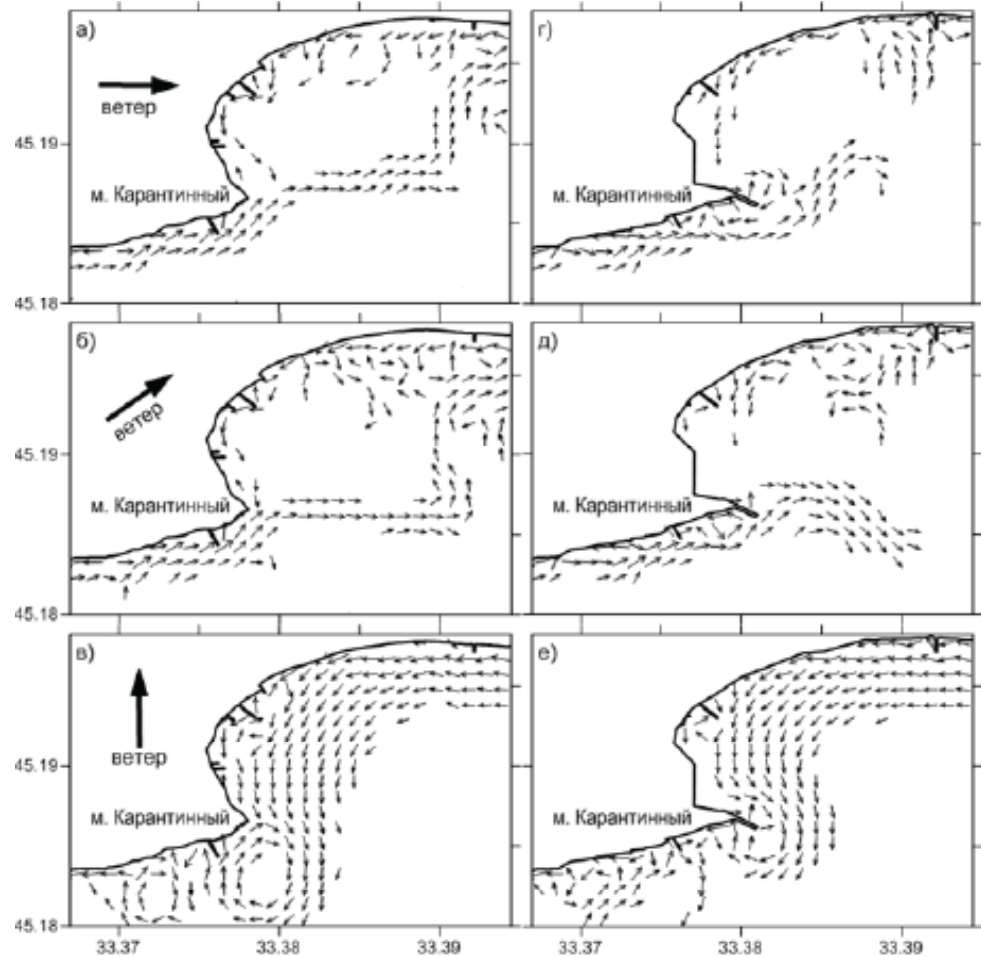


Рис. 1. Скорость и направление ветро-волновых течений в Евпаторийской бухте до (а, б, в) и после (г, д, е) строительства мола при западном (а, г), юго-западном (б, д) и южном (в, е) направлениях ветра.

Наибольшие скорости течения (40-60 см/с) отмечаются у берега в восточной и западной частях расчетной акватории. По мере приближения к м. Карантинный они уменьшаются. При З и ЮЗ ветрах скорости течения во внутренней части бухты крайне малы.

После строительства мола, севернее его в поле течений стала наблюдаться антициклоническая завихренность течений, как это обычно бывает у линейных искусственных препятствий. Скорости течений во внутренней части бухты уменьшились от 8 до 1 см/с, что может способствовать аккумуляции переносимого водным потоком осадочного материала в этом районе. При действии З и ЮЗ ветров вдольбереговые течения не объединяются в единый поток. При сравнении ситуаций до и после строительства мола при воздействии Ю ветра обращает на себя

внимание, что упомянутые выше антициклонические вихри к югу от м. Карантинного практически исчезли.

*Структура трассы движения наносов.* Расчеты расхода и направления потока наносов проводились из предположения о насыщенности потока наносов. В действительности же исследуемый район испытывает дефицит наносного материала. Поэтому при анализе полученных результатов, области увеличения значений расхода наносов (измеряемого в  $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$ ) интерпретировались как участки, где поток пытается насытиться материалом и таким образом может происходить размыв берега и подводного склона. Анализ полученных результатов показал, что для всех ситуаций основное перемещение наносного материала осуществляется в основном от 0 до изобат 3,5-4,0 м.

В западной части расчетной акватории при действии З и ЮЗ ветров существует подвижка наносов со значениями 0,6-0,8  $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$ , направленная на северо-восток к м. Карантинному (рис. 2).

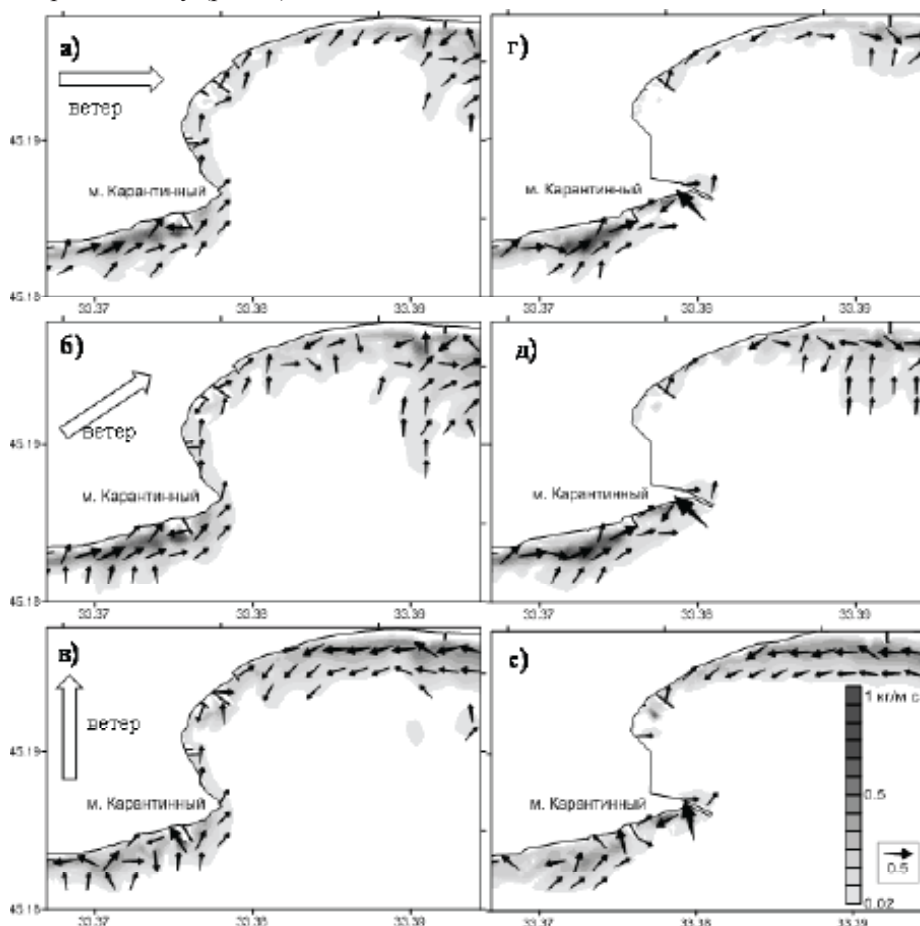


Рис. 2. Направление движения наносов и значения их расхода в Евпаторийской бухте до строительства мола (а, б, в), после строительства мола с дноуглублением (г, д, е), образующихся при западном (а, г), юго-западном (б, д) и южном (в, е) направлениях ветра.

При Ю ветре движение наносов на этом участке имеет более сложную структуру и значения до 0,4-0,5 кг/м·с, но общее направление перемещения материала сохраняется. По мере приближения к мысу расход подвижки уменьшается до 0,3-0,1 кг/м·с, а это может приводить к отложению материала в непосредственной близости у м. Карантинного в районе пляжей, относящихся к санаторию Министерства обороны Украины. Можно допустить, что для ситуации до строительства портового мола так оно и происходило, а небольшая часть наносов, огибая мыс, проникала в район порта. Однако, после строительства мола при Ю, ЮЗ и З ветрах материал практически перестал поступать в бухту. При этом западнее мола происходит резкое увеличение расхода подвижки наносов с 0,1 до 0,7-1 кг/м·с, что может приводить к деградации здесь пляжей. Так, собственно, и наблюдается в реальности.

В восточной части акватории при З и ЮЗ ветрах образуются разнонаправленные подвижки с небольшими значениями переноса вблизи бухты (0,1-0,25 кг/м·с). При действии З ветра наблюдаются две слабощные трассы: одна — из бухты в северо-восточном направлении (до 0,1 кг/м·с), а другая — от пересыпи оз. Сасык в юго-западном направлении. При ЮЗ ветре образуются те же подвижки, однако, происходит усложнение структуры трассы, направленной на юго-запад. При действии Ю ветра происходит формирование устойчивого движения наносов от пересыпи оз. Сасык в сторону бухты. Средние значения переноса наносов в воде составляют 0,3-0,5 кг/м·с.

При моделировании подвижек наносов получено, что в ситуации с дноуглублением перемещение материала в бухте практически отсутствует. Но вот без дноуглубления наблюдается незначительное перемещение материала в северном направлении.

Анализ результатов расчетов показал, что для ситуации до строительства мола при всех рассмотренных направлениях ветра существовал поток, направленный из бухты. После строительства мола и дноуглубления этот поток стал нестабилен, что наиболее заметно при действии Ю ветра. На рис. 2 видно, что до строительства мола поток наносов от оз. Сасык заканчивался северо-восточнее бетонной набережной, чему способствовал поток из бухты. После строительства мола вынос из бухты практически перестал существовать. Теперь ослабление движения наносов от пересыпи оз. Сасык происходит уже в бухте, где значения уменьшаются до 0,2-0,1 кг/м·с, в результате происходит отложение материала на акватории порта. Производя же дноуглубление в порту, песок со дна сбрасывается в восточной части расчетной области у пересыпи оз. Сасык, чем осуществляется подпитка потока, направленного в бухту. Материал перемещается в юго-западном направлении и вновь возвращается в акваторию порта.

## ВЫВОДЫ

1. После строительства мола высоты волн в Евпаторийской бухте уменьшились в среднем на 20-30%.
2. Модельные течения имеют вид вдольбереговых токов воды, интенсивность и положение которых зависит от угла подхода волн к береговой линии. Максимальные измеренные вдольбереговые скорости волновых течений характерны для волнения от южных румбов и составляют 50-60 см/с.
3. Основное перемещение наносов осуществляется в интервале глубин 0-4 м.

4. До строительства мола, при всех рассмотренных направлениях ветра, существовал поток, направленный из бухты. После строительства мола и дноуглубления этот поток стал нестабилен, что наиболее значимо при действии южного ветра.

5. После строительства мола, западнее него резко возрос расход наносов, что может приводить к деградации существующих здесь пляжей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горячкин Ю.Н. Характеристики волновых течений в Каламитском заливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2010. – Выпуск 23. – С. 159 – 165
2. Горячкин Ю.Н., Долотов В.В. Изменения береговой линии аккумулятивных берегов Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежн. и шельфов. зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2011. – Выпуск 25. – Том 1. – С. 8 – 18.
3. Иванов В.А., Михинов А.Е. Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (практические рекомендации и примеры расчетов) // Препринт НАН Украины. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1991. – 50 с.
4. Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне моресуша. – Севастополь: ЭКОСИ, 2008. – 363 с.
5. SWAN Cycle III. version 40.85: User Manual // Delft University of Technology Annual. – 2011. – Т. 25. – № 1. – P. 8 – 18.

**Ю.М. Горячкин, В.В. Фомин, Л.В. Харитонова**

Морський гідрофізичний інститут НАН України,  
2, Капітанська вул., Севастополь-11, 99011, Україна

#### ДИНАМІКА НАНОСІВ В БУХТІ ЄВПАТОРІЙСЬКОЇ

##### Резюме

Розглянуто результати математичного моделювання вітрового хвилювання, хвилевих течій і трас руху наносів для району Євпаторійської бухти і прилеглої акваторії. Показані відмінності в їх характеристиках в ситуації до будівництва молу в порту в 1979 р. і після. Використана спектральна модель SWAN.

**Ключові слова:** математичне моделювання, вітрове хвилювання, течії, потік наносів, побережжя Євпаторії.

**Y.N. Goryachkin, V.V. Fomin, L.V. Kharitonova**

Marine Hydrophysical Institute NA Sc of Ukraine,  
2, Capytanskaya st., Sevastopol, 99011, Ukraine

#### SEDIMENTS DYNAMICS IN EVPATORIA BAY

##### Resume

Results mathematical modeling of wind waves, wave currents and streams of deposits for the region of the Evpatoriysky bay and the adjacent water area are considered. Distinctions in their characteristics in a situation before pier construction in port in 1979 and are shown after. The spectral SWAN model is used.

**Keywords:** mathematical modeling, wind waves, currents, sediment flux, the coast of Evpatoria.