

В.В.Фомин, Д.В.Алексеев, Л.В.Харитонова

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРФОДИНАМИКИ БАКАЛЬСКОЙ КОСЫ

Выполнено моделирование эволюции Бакальской косы под действием штормового волнения, проникающего из северо-западной части Черного моря. Использована гидродинамическая модель *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*). Проанализирована связь направлений волновых течений, потоков наносов, положений зон размыва и аккумуляции с направлениями набегания волн. Установлено, что потоки наносов вдоль западного берега косы направлены от основания к дистальной части при юго-западном, западном – юго-западном и западном направлениях набегания волн и в обратном направлении при западном – северо-западном, северо-западном, северном – северо-западном направлениях набегания. Показано, что отделение дистальной части от основного тела косы может происходить при набегании волн с запада, запада – северо-запада, северо-запада.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *математическое моделирование, перенос наносов, волновые течения.*

**Введение.** Одним из наиболее динамически активных песчаных образований у берегов западного Крыма является, выдвинутая на 8 км в Каркинитский залив Бакальская коса. Ширина западной ветви косы составляет 30 – 80 м, восточной 1200 – 2000 м. К северу от косы на расстояние до 40 км тянется узкая подводная отмель – Бакальская банка. Глубины над ее вершиной достигают 3,5 – 4 м. Территория косы и акватория, прилегающая к ней, входят в состав регионального ландшафтного парка «Бакальская коса» и заказник общегосударственного значения «Малое филофорное поле» [1].

Основные представления о перемещении наносов у Бакальской косы были получены в работе [2]. Начиная с 2006 г., регулярные исследования динамики косы проводит МГИ НАН Украины. Комплексное применение натуральных исследований, спутниковых снимков и простейших схем расчетов потоков наносов позволило значительно расширить информацию о морфодинамике косы [3 – 5].

В период с 2007 по 2010 гг. неоднократно происходило отделение дистальной части от основного тела косы с последующим восстановлением перешейка между ними. Однако при каждом следующем восстановлении перешеек утончался и изменял конфигурацию. После штормов, прошедших осенью 2010 г., перешеек был размыт и до настоящего времени так и не восстановился, а дистальная часть косы превратилась в остров.

В данной работе представлены результаты численного моделирования эволюции Бакальской косы под действием штормового волнения на основе гидродинамической модели *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*) [6].

**Математическая постановка задачи и метод решения.** Модель *XBeach* [6] создана для расчета волн, течений, транспорта наносов и изменений рельефа дна прибрежной зоны моря в штормовых условиях. Корот-

© В.В.Фомин, Д.В.Алексеев, Л.В.Харитонова, 2013

кие волны в данной модели описываются нестационарным уравнением баланса волновой энергии в спектральной форме [6]

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

где  $t$  – время;  $x$  и  $y$  – горизонтальные координаты;  $A = E_w/\sigma$  – плотность волнового действия;  $E_w$  – энергия волн;  $\sigma$  – собственная частота волн;  $\theta$  – направление распространения волн;  $D_w$  – скорость диссипации энергии вследствие обрушения волн;  $c_x$ ,  $c_y$  и  $c_\theta$  – скорости переноса энергии в направлении осей  $x$ ,  $y$  и  $\theta$ .

Обрушивающиеся волны передают энергию  $D_w$  бурунам, баланс энергии  $E_r$  которых находится из уравнения

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial(c_x E_r)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y E_r)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta E_r)}{\partial \theta} = D_w - D_r. \quad (2)$$

Здесь  $D_r$  – скорость диссипации энергии бурунов.

Возвышение уровня моря  $\eta$  и течения, индуцированные короткими волнами, описываются нелинейными уравнениями мелкой воды

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{F_x - \tau_{bx}}{\rho h}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{F_y - \tau_{by}}{\rho h}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

где  $u$ ,  $v$  – компоненты лагранжевой скорости течения;  $f$  – параметр Кориолиса;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\mu$  – коэффициент турбулентной вязкости;  $\rho$  – плотность воды;  $h$  – динамическая глубина;  $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$  – компоненты придонных касательных напряжений трения, квадратично зависящие от эйлеровых скоростей течений;  $F_x$ ,  $F_y$  – компоненты индуцированного волнами дополнительного импульса. Эти величины имеют вид

$$F_x = -\frac{\partial(S_{xx} + R_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(S_{xy} + R_{xy})}{\partial y}, \quad F_y = -\frac{\partial(S_{xy} + R_{xy})}{\partial x} - \frac{\partial(S_{yy} + R_{yy})}{\partial y}, \quad (6)$$

где  $S_{ij}$ ,  $R_{ij}$  зависят от  $E_w$ ,  $E_r$  и представляют собой напряжения, обусловленные соответственно наличием волн и бурунов.

Потоки наносов в *XBeach* определяются выражениями

$$Q_x = hCu^e - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial x}, \quad Q_y = hCv^e - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial y}, \quad (7)$$

где  $C$  – осредненная по глубине концентрация наносов;  $\mu_c$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $u^e$ ,  $v^e$  – эйлеровы компоненты скорости течений. Изменения  $C$  описываются уравнением адвекции-диффузии

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = h \frac{C_{eq} - C}{T_s}, \quad (8)$$

где  $C_{eq}$  – равновесная концентрация;  $T_s$  – время адаптации концентрации к равновесному состоянию.

Далее по известным  $Q_x, Q_y$  определяются деформации дна из уравнения

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\varphi}{1-p} \left( \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) = 0, \quad (9)$$

где  $z_b$  – координата донной поверхности;  $p$  – пористость грунта;  $\varphi = 1 - 10$ .

При решении уравнения (1) на твердых боковых границах полагается  $E_w = 0$ . По угловой переменной используется условие периодичности  $E_w(\theta = 0) = E_w(\theta = 2\pi)$ , по частотной переменной для минимальной  $\sigma_{\min}$  и максимальной  $\sigma_{\max}$  частот – условие  $E_w(\sigma_{\min}) = E_w(\sigma_{\max}) = 0$ . В *XBeach* для задания граничных условий на мористой границе используется 2-х-мерный частотно-угловой спектр вида

$$E(\sigma, \theta) = F(\sigma) \psi(l) \cos^{2l} \left( \frac{\theta - \bar{\theta}}{2} \right), \quad \psi(l) = \frac{2^{2l-1} \Gamma^2(l+1)}{\pi \Gamma(2l+1)}, \quad (10)$$

где  $l$  – показатель степени углового рассеивания волн;  $\Gamma$  – гамма-функция;  $F(\sigma)$  – частотный спектр *JONSWAP* (*Joint North Sea Wave Project*), определяемый по формуле

$$F(\sigma) = 0,307 \alpha_F \frac{h_s \exp(-1,23a^{-4})}{\sigma_p a^5} \gamma^\beta, \quad (11)$$

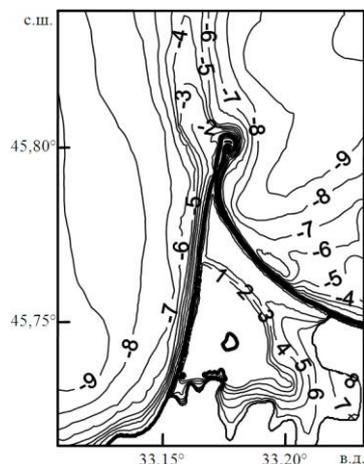
где  $a = \sigma/\sigma_p$ ,  $\beta = \exp\left(-\frac{(a-1)^2}{2b}\right)$ ,  $b = \begin{cases} 0,07 & \text{при } a \leq 1 \\ 0,09 & \text{при } a > 1 \end{cases}$ ,  $h_s$  – высота значи-

тельных волн;  $\sigma$  – частота волн;  $\sigma_p$  – частота волн, соответствующая пику спектра ( $\tau_p = 2\pi/\sigma_p$  – период пика спектра);  $\gamma$  – параметр пиковатости спектра;  $\alpha_F = 0,0131$  – обобщенный параметр Филлиппса.

В уравнениях мелкой воды (3) – (5) и уравнении адвекции-диффузии (8) на твердых боковых границах предполагается отсутствие потоков жидкости и наносов. На жидких границах используется условие свободного прохождения [6].

**Анализ результатов численных экспериментов.** Рассмотрим перенос наносов в районе Бакальской косы волновыми течениями. Интенсивность волнения определяется, помимо силы ветра и морфологических особенностей морского бассейна, так же величиной разгона волн. Наибольший разгон имеют волны, проникающие в Каркинитский залив из северо-западной части Черного моря [7], поэтому ограничимся рассмотрением случаев их набегания в район Бакальской косы с юго-запада, запада – юго-запада, запада, запада – северо-запада, северо-запада, севера – северо-запада.

Рельеф дна расчетной области приведен на рис.1. Шаги сетки по осям  $x$  и  $y$  составляют 22,3 и 31,3 м соответственно. На восточной и северной границах расчетной области задавались условия свободного прохождения, а на западной границе характеристики входящих волн определялись на основе соотношений (10) – (11). Параметры частотного спектра *JONSWAP* принимались следующими: высота значительных волн  $h_s = 4$  м; пиковый период волн  $\tau_p = 6$  с; параметр пиковатости спектра  $\gamma = 3,3$ ; показатель степени уг-

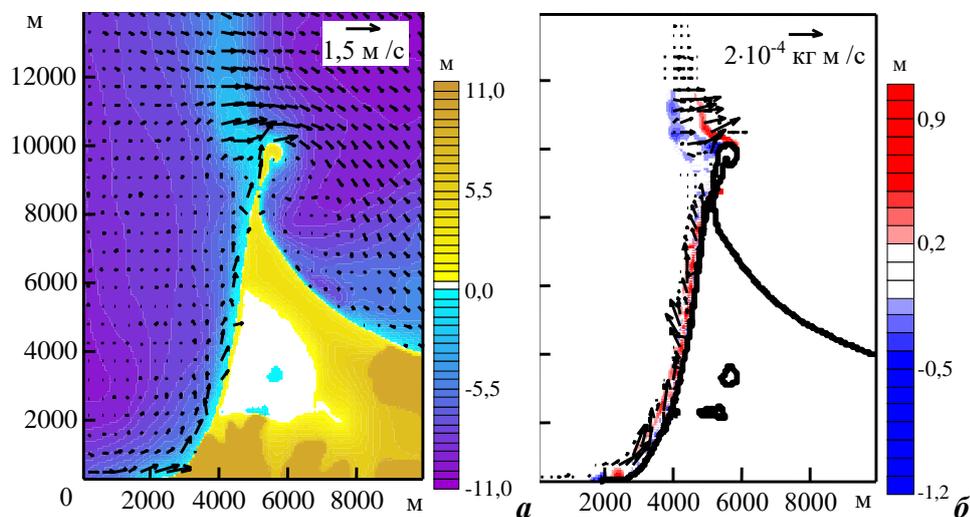


Р и с . 1 . Рельеф области в районе Бакальской косы (м). Положительные значения отсчитываются от невозмущенной поверхности моря вверх.

лового рассеивания волн  $l = 10$ . Данные параметры соответствуют развитому ветровому волнению штормовой силы и получены из предварительных численных экспериментов с использованием спектральной волновой модели SWAN [8]. В начальный момент времени наносы, имеющие плотность  $2650 \text{ кг/м}^3$  и диаметр частиц  $D_{50} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , предполагались равномерно распределенными по дну расчетной области. Учитывалось влияние штормового нагона высотой  $0,5 \text{ м}$ . Расчеты проводились на 5 сут.

Направления волновых течений, а, следовательно, и направления транспорта наносов в непосредственной близости от Бакальской косы существенно отклоняются от направлений волн на западной границе рассматриваемой области. В случае набегания волн с юго-запада и запада – юго-запада вдоль западного берега косы течения направлены от ее основания к дистальной части. Это же направление характерно и для потоков наносов. Размыв дна происходит непосредственно вдоль всего западного побережья косы. Аккумуляция наносов имеет место мористее зон размыва, однако вследствие переноса течениями их запас на дне ближе к северной части косы оказывается больше, чем у ее основания. Непосредственно с северо-запада от оголовка косы располагается небольшая зона размыва дна, а с северо-востока – зона аккумуляции наносов. Наличие этих зон не приводит к существенному изменению формы оголовка. Отделения дистальной части от основного тела косы при набегании волн с юго-запада и запада – юго-запада не происходит.

Географическое положение Бакальской косы максимально препятствует распространению волн, набегающих с запада. При этом, как и в случаях набегания волн с юго-запада и запада – юго-запада, волновые течения у западного берега косы направлены от ее основания к дистальной части (рис.2, а), но их интенсивность оказывается более чем в два раза слабее. Соответственно, менее интенсивным становится и перенос наносов в меридиональном направлении. Распределение зон аккумуляции материала оказывается более равномерным вдоль западного берега Бакальской косы, чем в рассмотренных выше случаях. В районе узости в северной части косы размыв дна и берега приводит к образованию прорана, в результате чего дистальная часть косы отделяется от основного тела (рис.2, а). При этом процесс образования прорана происходит наиболее интенсивно по сравнению со всеми рассматриваемыми в данной работе случаями. У оголовка косы направление волновых течений совпадает с направлением набегающих волн. Интенсивность их достаточно велика для образования здесь обширной зоны размыва дна, простирающейся на северо-запад в район с малыми глубинами (рис.2, б). Изъятый в этой области материал переносится тече-



Р и с . 2 . Рельеф и скорости волновых течений (а), изменения рельефа дна и потоки наносов (б) после 5 сут воздействия волн, набегающих с запада.

ниями к востоку, где происходит его аккумуляция. В результате оголовки косы начинает изменять свою конфигурацию и смещаться к востоку.

При набегании волн с запада – северо-запада, северо-запада, севера – северо-запада волновые течения у западного берега Бакальской косы направлены от дистальной части к ее основанию. Причем, чем больше южная составляющая в направлении волн, тем более интенсивным и узким является вдольбереговое течение.

В случае западного – северо-западного направления набегания волн скорости вдольберегового течения достаточно малы. Как и в предыдущих случаях, у западного берега косы существуют зоны размыва дна, а мористее – зоны аккумуляции наносов. Несмотря на небольшую интенсивность течений в распределении отлагающихся на дне наносов прослеживается увеличение их количества при приближении к основанию косы. У оголовка косы течения, как и в случае набегания волн с запада, направлены с запада на восток. Зона размыва располагается с северо-запада от оголовка косы, зона аккумуляции лежит северо-восточнее него. При этом зоны размыва и аккумуляции сужаются при удалении от косы и становятся шире – в непосредственной близости от нее. Проран в теле косы образуется, но менее интенсивно, чем при набегании волн с запада.

При северо-западном и северном – северо-западном направлениях набегания волн вследствие увеличения скоростей вдольбереговых течений усиливается размыв дна и растет мощность потоков наносов, направленных к основанию косы. Вблизи оголовка косы направления течений меньше отклоняются от направлений вызывающих их волн. С ростом южной составляющей в скоростях течений увеличивается глубина размыва дна с северо-запада от оголовка косы, а зона аккумуляции наносов с северо-востока – расширяется. Такое перемещение наносов способствует формированию крючковидной формы оголовка косы. При этих направлениях волн стано-

вяться существенными потоки наносов вдоль восточного берега Бакальской косы. Направлены они на юго-восток и формируются ближе к ее основанию. При набегании волн с северо-запада еще происходит отделение дистальной части от основного тела косы прораном, а при изменении направления набегания волн на север – северо-запад образования прорана уже не происходит.

#### **Выводы.**

1. Набегание волн с юго-запада, запада – юго-запада и запада вызывает перенос наносов от основания к дистальной части Бакальской косы вдоль западного ее побережья. В последнем случае у оголовка косы преобладает перемещение материала с запада на восток.

2. При западном – северо-западном, северо-западном и северном – северо-западном направлениях набегания волн вдольбереговые потоки наносов у западного берега косы направлены от дистальной части к основанию, а у ее оголовка – на запад (западное – северо-западное направление набегания) или в соответствии с направлением набегающих волн (северо-западное и северное – северо-западное направления набегания).

3. Во всех рассмотренных случаях с северо-запада от оголовка косы образуется область размыва дна, а с северо-востока – область аккумуляции материала. Глубина размыва и количество аккумуляированных наносов увеличиваются при изменении направления набегания волн от юго-запада до севера – северо-запада.

4. Гидродинамические условия, которые могут приводить к отделению дистальной части от основного тела косы, формируются при набегании волн с запада, запада – северо-запада и северо-запада.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Иванов В.А., Горячкин Ю.Н., Удовик В.Ф., Харитонова Л.В., Шутов С.А.* Современное состояние и эволюция Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– вып.26, т.1.– С.8-15.
2. *Зенкович В.П.* Бакальская коса // Сб. раб. Института океанологии АН СССР.– 1955.– № 4.– С.86-101.
3. *Горячкин Ю.Н., Удовик В.Ф., Харитонова Л.В.* Оценки параметров потока наносов у западного берега Бакальской косы при прохождении сильных штормов в 2007 году // Морской гидрофизический журнал.– 2010.– № 5.– С.42-51.
4. *Горячкин Ю.Н., Харитонова Л.В., Долотов В.В.* Изменчивость береговой линии северо-западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.20.– С.18-26.
5. *Харитонова Л.В.* Аккумулятивные формы Крымского берега Каркинитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.23.– С.208-216.
6. *Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R., Lescinski J* Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands // Coastal Engineering.– 2009.– 56.– P.1133-1152.

7. Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В., Черкесов Л.В. Моделирование ветровых волн и течений в Каркинитском заливе Черного моря // Доп. НАН України. – 2009.– № 10.– С.108-114.
8. <http://www.swan.tudelft.nl>.

Матеріал поступив в редакцію 18.08.2013 г.

*АНОТАЦІЯ* Виконано моделювання еволюції Бакальської коси під дією штормового хвилювання, що проникає з північно-західної частини Чорного моря. Використана гідродинамічна модель *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*). Проаналізовано зв'язок напрямків хвильових течій, потоків наносів, положень зон розмиву й акумуляції з напрямками набігання хвиль. Встановлено, що потоки наносів уздовж західного берега коси спрямовані від основи до дистальної частини при ПдЗ, ЗПдЗ і З напрямках набігання хвиль і у зворотному напрямку при ЗПнЗ, ПнЗ і ЗПнПн напрямках набігання. Показано, що відділення дистальної частини від основного тіла коси може відбуватися при набіганні хвиль із З, ЗПнЗ і ПнЗ.

*ABSTRACT* Simulation of Bakalskaya Spit evolution caused by storm waves penetrating from north-west region of the Black Sea is carried out. *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*) hydrodynamic model is used. Relationship of directions of wave currents and sediment fluxes, locations of erosion and accumulation zones with wave running directions is analyzed. It is obtained, that sediment fluxes along the west coast of the spit are directed from base to distal part in case of SW, WSW and W directions of wave running and backward in case of WNW, NW and WNN directions of wave running. Separation of distal part from main spit body is shown can occur in case of wave running from W, WNW and NW.