

Влияние штормовых нагонов и ветровых волн на морфодинамические процессы в районе Бакальской косы

© 2015 Л.В. Харитоновна, Е.В. Иванча, Д.В. Алексеев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: dalexeev@rambler.ru

Поступила в редакцию 23.05.2014 г. После доработки 09.07.2014 г.

Изучено влияние направлений и высот ветровых волн, а также высот штормовых нагонов на процессы эрозии и аккумуляции наносов в районе Бакальской косы в Черном море. Использовалась численная модель *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*). Определены зависимости мест расположения и пространственных размеров областей эрозии и аккумуляции наносов от характеристик волн и нагонов. Установлено, что при отсутствии нагонов наиболее интенсивный размыв перешейка косы происходит при набегании волн с запада по сравнению со случаями набегания волн с юго-запада и северо-запада. Наличие нагонов может приводить как к усилению, так и ослаблению процесса размыва в зависимости от направления волн. Изменение высот набегающих волн оказывает меньшее влияние на морфодинамические процессы, чем изменение высоты нагонов.

Ключевые слова: ветровые волны, волновые течения, наносы, численное моделирование.

Введение. Каркинитский залив Черного моря в силу морфологических особенностей (глубины 10 – 35 м, песчано-илистая с добавлением ракушечника структура дна, наличие островов и кос) является районом интенсивных морфодинамических процессов. Особой динамической активностью характеризуется вдающаяся на 8 км в Каркинитский залив песчаная Бакальская коса. Ширина западной ветви косы составляет 30 – 80 м, восточной — 1200 – 2000 м [1]. К северу от косы на расстояние до 40 км тянется узкая подводная отмель – Бакальская банка. Глубины над ее вершиной достигают 3,5 – 4 м.

Согласно работе [2], основные морфодинамические процессы в районе Бакальской косы заключаются: в размыве западного берега косы; выдвигании ее дистальной части в акваторию Каркинитского залива в северо-восточном направлении; уменьшении ширины косы в районе перешейка, соединяющего основное тело косы с дистальной частью; отделении дистальной части от основного тела косы. После штормов, прошедших осенью 2010 г., перешеек был размыв и до настоящего времени так и не восстановился, а дистальная часть косы превратилась в остров.

Динамика наносов в районе Бакальской косы зависит от параметров ветрового волнения и колебаний уровня моря [1], что необходимо корректно учитывать при численном моделировании. Однако в задании этих параметров, исходя из натуральных данных или численных расчетов, всегда содержится некоторая неопределенность [3]. Поэтому представляет интерес оценка зависимости результатов моделирования морфодинамических процессов в районе Бакальской косы от изменений параметров ветровых волн и уровня моря. В данной работе такие оценки выполнены на основе численной гидродинамической модели *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*) [4].

Математическая постановка задачи и метод решения. Модель *XBeach* включает в себя взаимодействующие блоки по расчету коротких ветровых волн, баротропных течений и динамики наносов. Короткие волны в модели описываются нестационарным уравнением баланса волновой энергии в спектральной форме [4]. При этом учитывается угловое распределение волнового спектра и используется одна пиковая частота, что соответствует предположению об узкополосности спектра в частотной области. Уравнение баланса волновой энергии имеет вид

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

где t – время; x и y – горизонтальные координаты; $A = E_w/\sigma$ – плотность волнового действия; E_w – энергия волн; σ – собственная частота волн; θ – направление распространения волн; D_w – скорость диссипации энергии вследствие обрушения волн; c_x , c_y и c_θ – скорости переноса энергии в направлении осей x , y и θ . Второе и третье слагаемые в уравнении (1) описывают перенос энергии вдоль координатных осей x , y , четвертое – учитывает эффекты рефракции волн на неоднородностях рельефа дна и течениях.

Для описания передачи энергии от обрушающихся волн к бурунам используется уравнение баланса энергии бурунов E_r [5]:

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

Здесь в качестве источника энергии выступает D_w , а D_r – скорость диссипации энергии самих бурунов.

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 η – возвышение уровня; u , v – компоненты скорости течения; f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести; μ – коэффициент турбулентной вязкости; ρ – плотность воды; h – динамическая глубина; τ_{bx} , τ_{by} – компоненты придонных касательных напряжений трения, квадратично зависящие от скоростей течений; F_x , F_y – компоненты индуцированного волнами дополнительного импульса. Эти величины имеют вид

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

В формулах (6) S_{ij} и R_{ij} ($i, j = x, y$) – напряжения, обусловленные соответственно наличием волн и бурунов и зависящие от E_w и E_r .

Потоки наносов в модели *XBeach* определяются выражениями [5]

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

здесь C – осредненная по глубине концентрация наносов; μ_c – коэффициент турбулентной диффузии. Изменения C описываются адвективно-диффузионным уравнением вида

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

в котором C_{eq} – равновесная концентрация; T_{eq} – время адаптации концентрации к равновесному состоянию. Далее по известным величинам Q_x и Q_y определяются деформации дна из уравнения [5]

$$(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

где $q_x = Q_x + \alpha|u| \frac{\partial z_b}{\partial x}$; $q_y = Q_y + \alpha|v| \frac{\partial z_b}{\partial y}$; z_b – координата донной поверхности; p – пористость грунта; $\alpha = 1-10$ – настроечный параметр.

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 σ_{\min} и максимальной σ_{\max} частот – условие $E_w(\sigma_{\min}) = E_w(\sigma_{\max}) = 0$. В модели *XBeach* для задания граничных условий на мористой границе используется 2-мерный частотно-угловой спектр вида

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

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

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

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 значительных волн; σ_p – частота волн, соответствующая пику спектра ($\tau_p = 2\pi/\sigma_p$ – период пика спектра); γ – параметр пиковатости спектра; $\alpha_F = 0,0131$ – обобщенный параметр Филлипса.

В уравнениях мелкой воды (3) – (5) и уравнении переноса наносов (8) на твердых боковых границах предполагается отсутствие потоков жидкости и донных осадков. На жидких границах принимается условие слабого отражения, основывающееся на методе характеристик [4].

В модели *XBeach* для разностной аппроксимации уравнений (1) – (9) используется прямоугольная разнесенная сетка. Глубина, уровень, концентрация наносов, энергия волн и бурунов определяются в центрах ячеек, а компоненты скорости течений, потоки наносов и правые части уравнений (3) и (4) – посередине боковых границ. Интегрирование осуществляется на основе явной схемы с автоматическим выбором временного шага. В разностной схеме, применяемой в модели *XBeach*, реализован алгоритм осушения – затопления [4].

Входные параметры. Цифровая модель рельефа района исследования построена на основе навигационной карты Каркинитского залива в масштабе 1:200 000 и данных, полученных в результате экспедиций Морского гидрофизического института в июле 2007 г. В ходе экспедиции 21 июля с маломерного судна была выполнена батиметрическая съемка прибрежной зоны Бакальской косы. Контур береговой линии и поперечные профили перешейка и оголовка косы по данным высокоточной *GPS*-съемки получены в ходе экспедиции 27 – 28 июля (рис. 1, *a*). Анализ поперечных профилей через тело косы показал, что в районе перешейка, отделяющего оголовка от основного тела косы, превышение пляжа над уровнем моря составляет до 0,9 м.

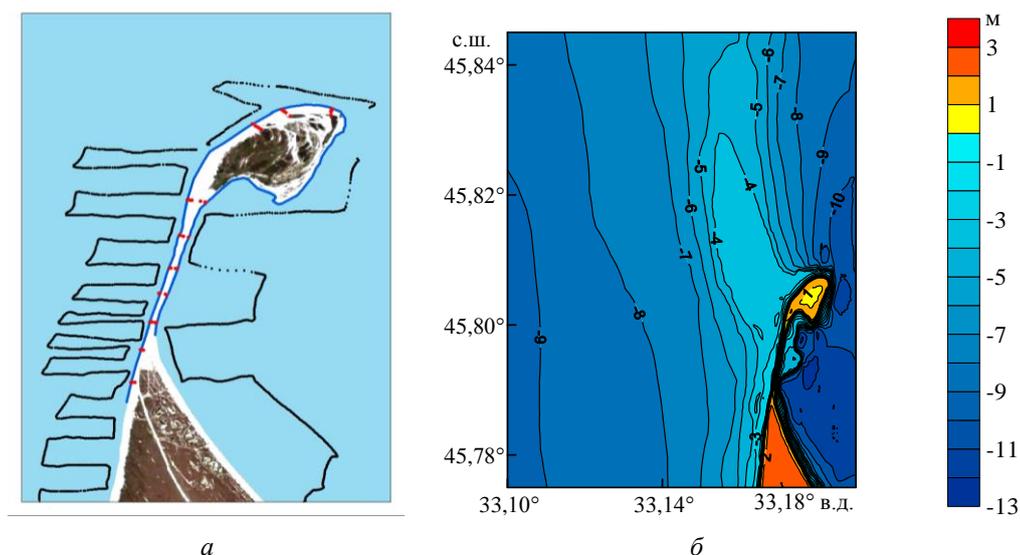


Рис. 1. Схема промерных работ в районе Бакальской косы в июле 2007 г. (черные точки – измерения глубин, красные точки – поперечные профили через тело косы, синяя линия – измеренный контур береговой линии) (*a*), а также карта-схема рельефа суши и дна (м) расчетной области (*б*)

Рельеф дна расчетной области, которая охватывает северную часть Бакальской косы и Бакальскую банку и имеет размеры 2,2 × 2,9 км, приведен на

рис. 1, б. Шаги сетки по осям x и y составляют 17 и 19 м соответственно. Поскольку Бакальская коса является песчаным образованием [1], то будем полагать, что сама коса и дно в непосредственной близости от нее сложены среднегранулированным песком с диаметром частиц $D_{50} = 5 \cdot 10^{-4}$ м и плотностью 2650 кг/м³ [6].

Анализ результатов численных экспериментов. Известно [7], что на морфодинамические процессы в береговой зоне моря основное влияние оказывают ветровые волны и вызываемые ими волновые течения. Направление распространения волн и их интенсивность определяются ветровым воздействием, а также особенностями береговой линии и дна. Помимо этого на транс-формацию волн вблизи берега влияют локальные гидродинамические процессы, такие как сгонно-нагонные колебания, которые могут приводить к существенному увеличению динамической глубины. Например, в кутовой части Каркинитского залива штормовые нагоны могут достигать 4 м [8]. Поэтому изучим влияние направления и интенсивности ветровых волн, а также величины штормовых нагонов на процесс размыва Бакальской косы.

Вначале рассмотрим перенос наносов при набегании волн штормовой силы с юго-запада, запада и северо-запада при отсутствии штормовых нагонов. На северной, восточной и южной границах расчетной области для волн задавались условия свободного прохождения. На западной границе параметры входящих волн определялись на основе соотношений (10), (11). Поскольку модель *XBeach* применяется для небольших по размерам областей береговой зоны, то пространственная изменчивость волнового спектра, задаваемого на западной границе, в модели не учитывается. Параметры частотного спектра *JONSWAP* в численных экспериментах здесь принимались следующими: высота значительных волн $h_s = 4$ м; пиковый период волн $\tau_p = 6$ с; параметр пиковатости спектра $\gamma = 3,3$; показатель степени углового рассеяния волн $l = 10$. Данные параметры соответствуют развитому ветровому волнению штормовой силы и получены из предварительных численных экспериментов с использованием спектральной волновой модели *SWAN (Simulating Waves Near Shore)* [9].

Направления установившихся (через 10 ч после начала воздействия ветровых волн) волновых течений в основном соответствуют направлениям набегающих волн во всех рассматриваемых случаях. Локальные особенности в поле скоростей волновых течений проявляются вблизи Бакальской косы и над Бакальской банкой. Так, при набегании волн с юго-запада в узкой полосе вдоль западного берега косы имеет место усиление скоростей течений, а при набегании волн с северо-запада у северной оконечности косы прослеживается циклонический круговорот. Над Бакальской банкой в этих случаях волновые течения направлены практически меридионально.

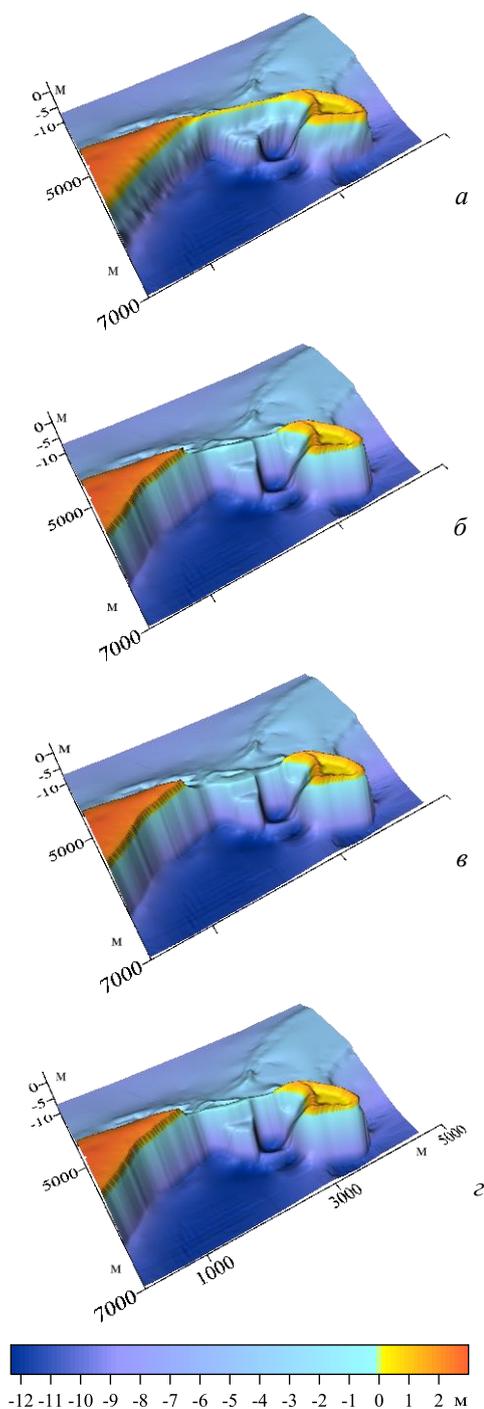


Рис. 2. Профиль Бакальской косы (м) до начала воздействия волн и течений (а) и после 24 ч набегания волн с юго-запада (б), запада (в) и северо-запада (з)

Разрыв перешейка между дистальной частью косы и ее телом и образование прораны наблюдаются при всех рассматриваемых направлениях волн (рис. 2, а – з). Наиболее интенсивно этот процесс происходит при набегании волн с запада (рис. 2, в). За 4 ч участок косы в районе перешейка оказывается полностью под водой, а после 24 ч глубины там достигают 2 – 3 м (рис. 3, в). При набегании волн с юго-запада и северо-запада перешеек оказывается размытым за 8 ч, а за 24 ч он оказывается под поверхностью воды на глубинах 1 – 2 м (рис. 3, а, д). Во всех рассматриваемых случаях в образовавшейся проране в направлениях волновых течений увеличивается зональная составляющая. Кроме того, при набегании волн с запада происходит локальное усиление волновых течений в месте размыва.

Эрозия дна в рассматриваемых случаях набегания волн происходит на протяжении всей береговой зоны Бакальской косы (рис. 3, б, з, е). Интенсивность данного процесса оказывается максимальной вдоль западного побережья в районе перешейка, у северо-восточного участка оголовка, а также у восточного берега южнее и севернее образовавшейся на месте перешейка прораны. При набегании волн с запада области эрозии непосредственно в районе перешейка по площади оказываются самыми обширными как в зональном, так и меридиональном направлениях (рис. 3, з). В случае набегания волн с юго-запада эрозия происходит на несколько больших глубинах, чем при набегании волн с северо-запада (рис. 3, б, е).

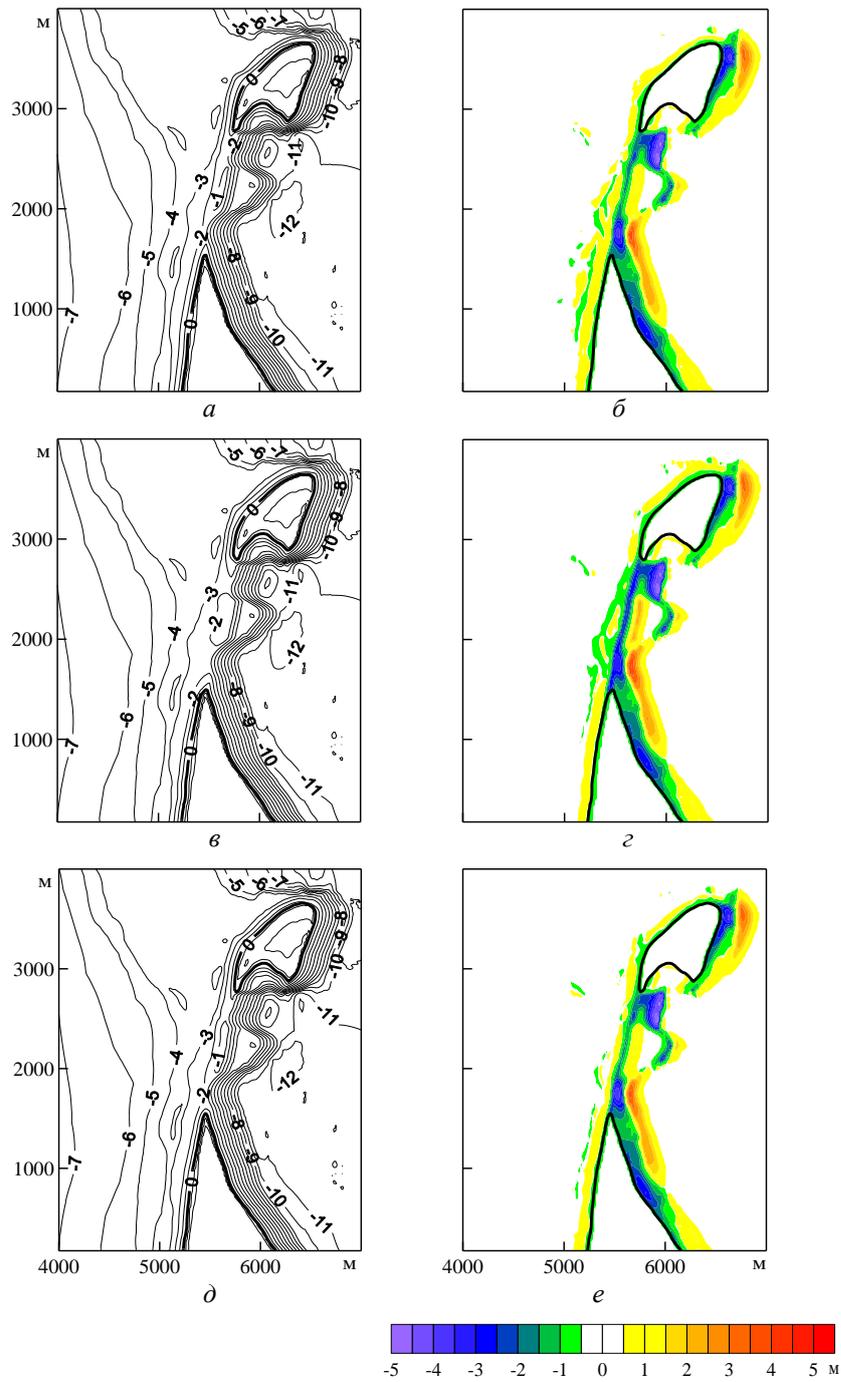


Рис. 3. Рельеф суши и дна (м) в районе Бакальской косы после 24 ч набегания волн высотой 4 м с юго-запада (а), запада (б) и северо-запада (д) и соответствующие изменения рельефа (б, з, е)

Аккумуляция наносов на дне имеет место мористее районов эрозии в непосредственной близости от них (рис. 3, б, з, е). Однако это происходит не вдоль всей береговой линии Бакальской косы. Так, при набегании волн с за-

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ № 1 2015 85

пада области аккумуляции западнее перешейка практически не образуются. Во всех рассматриваемых случаях наибольшее накопление наносов на дне происходит к востоку от оголовка косы и юго-восточнее прораны вдоль восточного берега косы. Западнее косы площадь областей аккумуляции наносов оказывается наибольшей при набегании волн с юго-запада, а восточнее косы – при набегании волн с запада (рис. 3, б, з). В последнем случае также наибольшим оказывается количество аккумулярованных наносов в районе восточнее прораны.

Перейдем к рассмотрению морфодинамических процессов при наличии штормовых нагонов. Расчеты проводились для четырех не изменяющихся со временем значений нагонов: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00 м. Поскольку высота перешейка Бакальской косы в используемом цифровом рельефе не превышает 0,6 – 0,7 м, то при нагонах величиной 0,75 и 1,00 м он оказывался полностью затопленным.

Пространственная структура установившихся волновых течений при наличии нагонов в основном сохраняется такой же, какой она была при их отсутствии. Изменения характеристик эрозионных процессов проявляются в областях с глубинами не более 3 м в непосредственной близости от Бакальской косы и зависят от направления набегания волн. В частности, при набегании волн с юго-запада и северо-запада интенсивность эрозионных процессов в районе перешейка с ростом величины нагонов увеличивается (рис. 4, а, д). При этом становится заметной разница в величине и пространственной локализации размыва в этих двух случаях. При набегании волн с северо-запада перешеек размывается несколько интенсивнее, чем в случае набегания волн с юго-запада. Например, в первом случае после 24 ч при нагоне высотой 0,75 м глубина размыва на отдельных участках перешейка достигает 3 м ниже невозмущенного уровня моря, а во втором случае такая глубина размыва достигается за то же время только при нагоне высотой 1 м. При интегрировании уравнений модели на более длительные интервалы времени указанные различия становятся заметными при меньших высотах нагонов. В случае набегания волн с запада, наоборот, при росте величины нагонов глубина размыва перешейка уменьшается (рис. 4, в). Так, после 24 ч размыв до 3 м ниже невозмущенного уровня моря при нагоне 0,25 м имеет место с севера и юга перешейка, за исключением его центральной части. При нагоне 0,50 м такая величина размыва прослеживается только с юга ближе к телу Бакальской косы.

Таким образом, полученные результаты согласуются с выводами, сделанными при выполнении расчетов на более грубой сетке без учета современных измерений топографии Бакальской косы [10], о том, что при наличии штормовых нагонов отделению оголовка от тела косы наиболее способствуют гидродинамические процессы, возникающие при набегании волн в диапазоне направлений от западного до северо-западного.

На пространственную локализацию областей эрозии вдоль берега Бакальской косы наличие штормовых нагонов значительного влияния не оказывает, в отличие от характеристик областей аккумуляции наносов. Наиболее заметно это влияние прослеживается вдоль западного берега. С увеличением высоты нагонов области аккумуляции здесь расширяются в мористом направлении, в ряде районов превышая по ширине области эрозии (рис. 4, б, з, е). Самые обширные области аккумуляции образуются при набегании волн с юго-запада. В случае набегания волн с запада после 24 ч при отсутствии нагонов области

аккумуляции в районе перешейка практически не прослеживаются, а при наличии нагонов величиной более 0,5 м они не только становятся значимыми, но по площади превышают области эрозии.

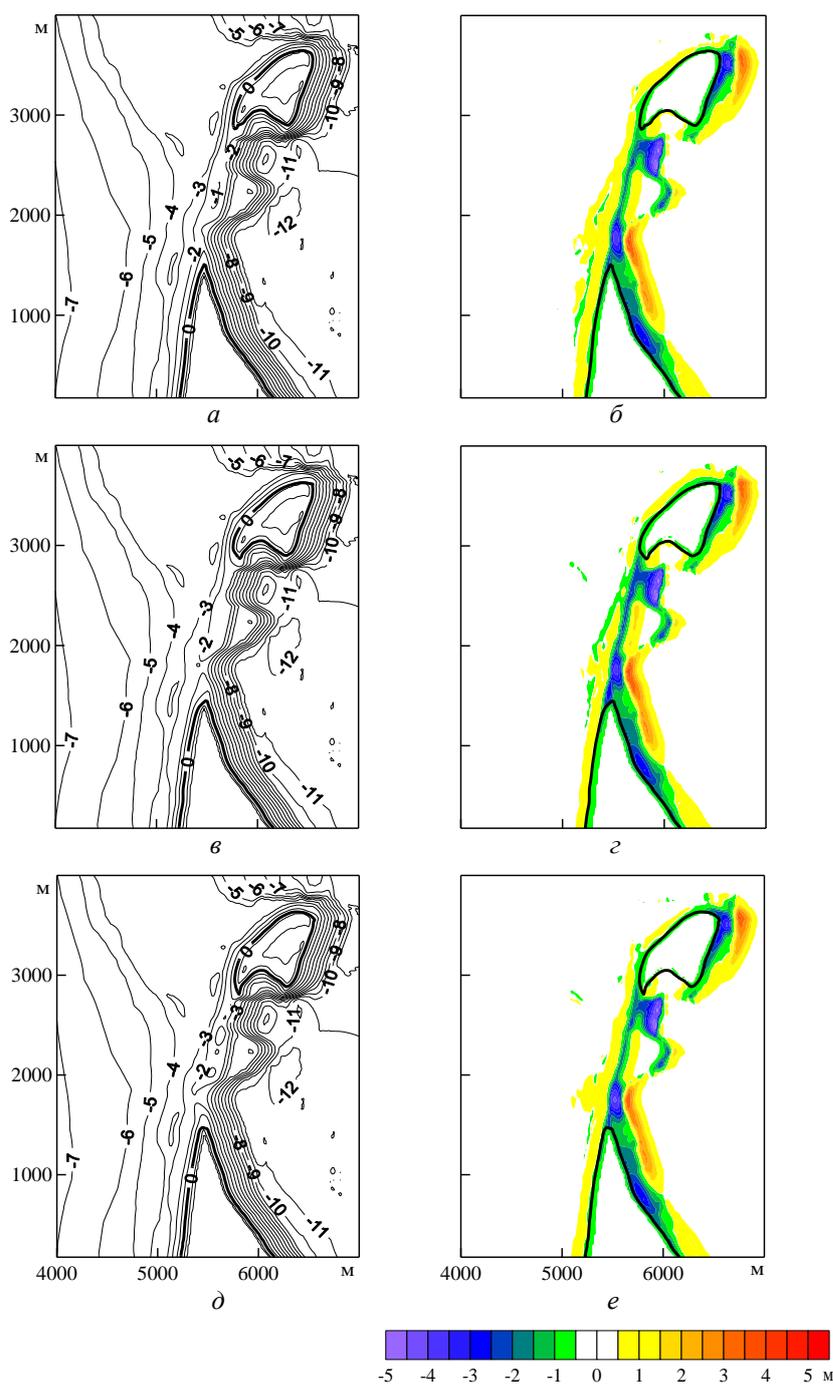


Рис. 4. Рельеф суши и дна (м) в районе Бакальской косы после 24 ч набегания волн высотой 4 м с юго-запада (а), запада (в) и северо-запада (д) и соответствующие изменения рельефа (б, з, е) при наличии нагона высотой 0,75 м

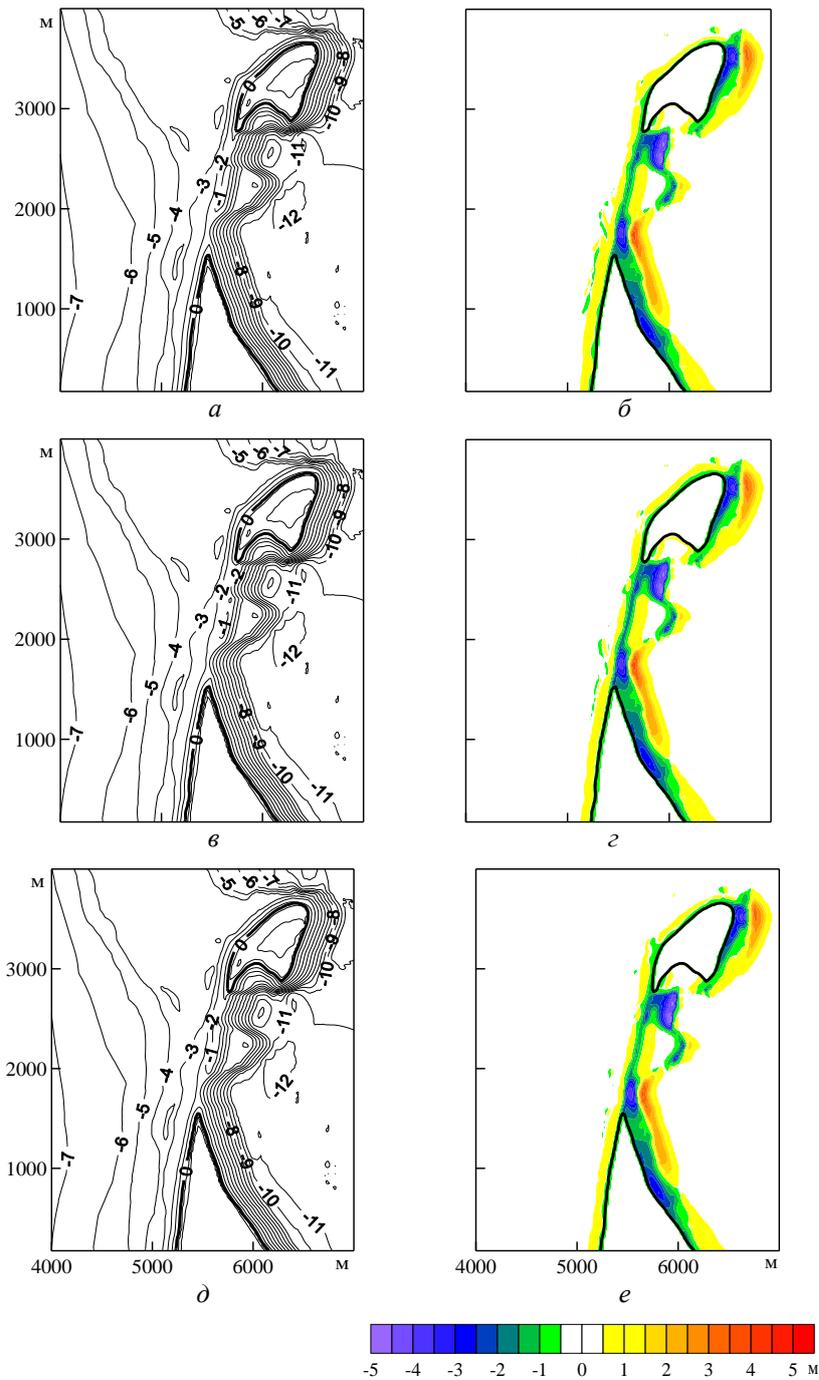


Рис. 5. Рельеф суши и дна (м) в районе Бакальской косы после 24 ч набегания волн высотой 2 м с юго-запада (а), запада (б) и северо-запада (д) и соответствующие изменения рельефа (б, з, е)

Изучим зависимости характеристик процессов эрозии от интенсивности волнения. Для этого рассмотрим волны с высотами $h_s = 3; 2$ м, набегające по тем же направлениям, что и в предыдущих численных экспериментах с

$h_s = 4$ м при отсутствии штормовых нагонов. Скорости волновых течений в районе Бакальской косы существенно ослабевают только при высотах волн 2 м. При этом пространственные особенности размыва перешейка Бакальской косы остаются такими же, как и в случае волн высотой 4 м, уменьшается лишь глубина размыва. При набегании волн с юго-запада и северо-запада она составляет преимущественно 1 м и только на малых участках достигает 2 м (рис. 5, а, д). При набегании волн высотой 3 м с запада участки размыва глубиной до 3 м еще имеют место, а при высоте волн 2 м величина размыва уже не превышает 2 м ниже невозмущенного уровня моря (рис. 5, в). Расположение областей эрозии и аккумуляции наносов в общем соответствует описанным выше случаям набегания волн высотой 4 м. Однако различия, обусловленные разными направлениями набегания волн, при этом становятся практически незначимыми (рис. 5, б, г, е). Следует отметить, что эффекты, вызываемые изменением величины нагонов, оказывают значительно большее влияние на морфодинамические процессы, чем изменение в одинаковом отношении соотношения высоты значительных волн. Аналогичные выводы получены в работе [3], в которой выполнены численные эксперименты по исследованию чувствительности модели *XBeach* к входным параметрам.

Выводы. В заключение кратко сформулируем основные результаты исследования зависимостей морфодинамических процессов в районе Бакальской косы от параметров ветрового волнения и штормовых нагонов.

Во всех рассмотренных случаях модель *XBeach* воспроизводит основные характеристики динамики Бакальской косы, полученные из анализа данных наблюдений [2]. К ним относятся в частности: смещение оголовка косы в северо-восточном направлении вследствие размыва его западной части и аккумуляции наносов вблизи северо-восточной части; размыв косы в районе перешейка, соединяющего основное тело косы с дистальной частью, вплоть до ее отделения.

Наиболее интенсивный размыв перешейка между оголовком и телом Бакальской косы при отсутствии нагонов происходит при набегании волн с запада. Набегание волн с юго-запада и северо-запада вызывает процессы размыва практически одинаковой интенсивности. Эрозия дна с разной силой происходит вдоль всей береговой линии косы. Аккумуляция наносов осуществляется мористее областей эрозии, но не непрерывно вдоль всего побережья. Области наибольшего накопления наносов расположены к востоку от оголовка косы и юго-восточнее прораны вдоль восточного берега косы.

Влияние штормовых нагонов на характеристики морфодинамических процессов зависит от направления набегания волн. В случаях набегания волн с юго-запада и северо-запада интенсивность размыва дна в районе перешейка с ростом величины нагонов увеличивается. Причем при набегании волн с северо-запада перешеек размывается несколько интенсивнее, чем при набегании волн с юго-запада. В случае набегания волн с запада рост величины нагонов приводит к уменьшению глубины размыва перешейка. На расположение областей эрозии наличие нагонов существенного влияния не оказывает. Области аккумуляции наносов при этом расширяются в мористом направлении.

Уменьшение интенсивности волнения приводит к уменьшению различий в пространственном распределении областей эрозии и аккумуляции наносов

при различных направлениях волн. Изменение высоты волн оказывает значительно меньшее влияние на процесс размыва Бакальской косы, чем изменение высоты штормовых нагонов.

Исследование выполнено при поддержке проекта «Разработка методов и создание экспериментального образца биотехнической системы мониторинга шельфовых зон морей Западной Арктики и Юга России, в том числе в районе Крымского полуострова, на основе спутниковых и контактных данных» (шифр «2014-14-579-0115-020, RFMEFI60714X0059»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А., Горячкин Ю.Н., Удовик В.Ф. и др. 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. Горячкин Ю.Н., Харитонов Л.В., Долотов В.В. Изменчивость береговой линии северо-западного Крыма // Там же. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 20. – С. 18 – 26.
3. McCall R. The longshore dimension in dune overwash modelling. Development, verification and validation of XBeach. – Thesis: Delft University of Technology, 2008. – 147 p.
4. XBeach Model Description and Manual. – Unesco-IHE Institute for Water Education, Delft and Delft University of Technology, 2010. – 106 p.
5. Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A. et al. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands // Coast. Engineer. – 2009. – 56. – P. 1133 – 1152.
6. Blumberg A.F. A primer for ECOMSED, Version 1.3. – Mahwah, New Jersey: HydroQual, Inc., 2002. – 188 p.
7. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1992. – 244 с.
8. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Современное состояние черноморских берегов Крыма // Доп. НАН України. – 2010. – № 10. – С. 87 – 92.
9. <http://www.swan.tudelft.nl>.
10. Фомин В.В., Алексеев Д.В., Харитонов Л.В. Моделирование морфодинамики Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – Вып. 27. – С. 374 – 380.

Effect of storm surges and wind waves on morphodynamic processes in the Bakalskaya Spit region

L.V. Kharitonova, E.V. Ivancha, D.V. Alekseev

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: dalexeev@rambler.ru

Effect of wind waves' directions and heights, and storm surge heights upon the sediment erosion and accumulation processes in the Bakalskaya Spit region of the Black Sea is studied. The numerical model *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*) is used. Dependencies of locations and spatial dimensions of the sediment erosion and accumulation areas upon the waves' and surges' characteristics are obtained. It is found that when surges are absent the spit isthmus is most intensely eroded at the wave running from the west as compared to the cases of the wave running from the south-west and the north-west. Presence of surges can result both in intensification and weakening of the erosion process depending on waves direction. Changes of the running waves' heights produce less impact upon the morphodynamic processes than those of the surge heights.

Keywords: wind waves, wave currents, sediments, numerical simulation.