



УДК 551.465(262.5)

Д. В. Алексеев

## Моделирование транспорта донных осадков в районе Голубого залива Черного моря

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Л. В. Черкесовым)

*Изучены процессы эрозии и седиментации донных осадков в районе Голубого залива Черного моря с использованием численной модели XBeach (eXtreme Beach behavior), которая описывает волны, течения, транспорт наносов и изменения рельефа дна. Источником энергии для прибрежных процессов являлось штормовое волнение. Рассмотрены случаи набегания штормовых волн из юго-западной и юго-восточной частей моря. Установлено, что при набегании волн из юго-восточной части моря эрозия происходит на больших глубинах (до 10 м), чем при набегании волн с юго-запада (до 5–10 м). В первом случае преобладает перенос донных осадков вдоль берега на северо-восток, а во втором — существенным оказывается перенос в направлении от берега. Накопление осадков происходит глубже областей эрозии в непосредственной близости от них.*

Проблема расчета переноса донных осадков особенно актуальна для береговой зоны морей, где происходит интенсивная трансформация и рассеивание энергии прибрежных вод [1]. Основной вклад в динамические процессы здесь вносят индуцируемые ветровым волнением течения [2], возникающие в результате диссипации энергии волн при их распространении к берегу. Скорость волновых течений в прибрежной зоне значительно больше, чем скорость постояннодействующих крупномасштабных течений, таких, например, как дрейфовые или термохалинные. Для Южного берега Крыма выполнены оценки интенсивности транспорта наносов волнами и течениями с использованием полуэмпирических методик, приведенных в монографии [2]. В данном сообщении представлены результаты расчетов переноса донных осадков в районе Голубого залива Черного моря с использованием численной гидродинамической модели XBeach (eXtreme Beach behavior) [3], описывающей волны, течения, транспорт наносов и изменения рельефа дна в штормовых условиях.

**1. Математическая постановка задачи.** Короткие волны в численной модели XBeach можно описать нестационарным уравнением баланса волновой энергии в спектральной форме [3]:

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

© Д. В. Алексеев, 2013

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  $\theta$ .

Для описания передачи энергии обрушающихся волн к роллерам используется уравнение баланса энергии роллеров  $E_r$  [3]:

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

Здесь в качестве источника выступает  $D_w$ , при этом скорость диссипации энергии самих роллеров  $D_r$ .

Возвышение уровня  $\eta$  и течения, индуцированные короткими и инфрагравитационными волнами, находим из нелинейных уравнений мелкой воды [3, 4]:

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

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

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

где  $u$ ,  $v$  — компоненты 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 скоростей течений;  $F_x$ ,  $F_y$  — компоненты индуцированного волнами дополнительного импульса:

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

Здесь  $S_{ij}$ ,  $R_{ij}$  зависят от  $E_w$ ,  $E_r$  и представляют собой напряжения, обусловленные соответственно наличием волн и роллеров. Потоки наносов в модели XBeach определяются выражениями [3]

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

где  $C$  — осредненная по глубине концентрация наносов;  $\mu_c$  — коэффициент турбулентной диффузии. Изменения  $C$  получаем из уравнения переноса и диффузии вида [3]

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - h \frac{C_{eq} - C}{T} = 0, \quad (8)$$

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

Далее по известным  $Q_x$ ,  $Q_y$  можно определить деформации дна, согласно уравнению [3]:

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

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;  $\alpha = 1-10$ .

При решении уравнения (1) на твердых боковых границах полагаем, что  $E_w = 0$ . По угловой переменной используется условие периодичности  $E_w(\theta = 0) = E_w(\theta = 2\pi)$ , по частотной переменной для  $\sigma_{\min}$  и  $\sigma_{\max}$  — условие  $E(\sigma_{\min}) = E(\sigma_{\max}) = 0$ . В численной модели XBeach для задания граничных условий на мористой границе используется двумерный 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 рассеивания волн;  $\Gamma$  — гамма-функция;  $F(\sigma)$  — частотный спектр JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), определяемый по формуле

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

где  $a = \frac{\sigma}{\sigma_p}$ ,  $\beta = \exp\left(-\frac{(a-1)^2}{2b}\right)$ ,  $b = \begin{cases} 0,07 & \text{при } a \leq 1, \\ 0,09 & \text{при } a > 1, \end{cases}$   $h_s$  — высота значительных волн;  $\sigma_p$  — частота волн, соответствующая пику спектра ( $\tau_p = 2\pi/\sigma_p$  — период пика спектра);  $\gamma$  — параметр пиковатости спектра;  $\alpha_F = 0,0131$  — обобщенный параметр Филлипса.

В уравнениях мелкой воды (3)–(5) и в уравнении транспорта осадков (8) на твердых боковых границах предполагается отсутствие потоков жидкости и осадков. На жидких границах применялось условие свободного прохождения [3].

**2. Анализ результатов численных экспериментов.** Рельеф дна расчетной области иллюстрирует рис. 1. Шаги сетки по осям  $x$  и  $y$  составляют 20 м. На восточной и западной границах расчетной области для волнения задавались условия свободного прохождения. На южной границе параметры входящих волн определялись на основе соотношений (10), (11). Параметры частотного спектра JONSWAP принимались следующими: высота значительных волн  $h_s = 6$  м; пиковый период волн  $\tau_p = 11$  с; параметр пиковатости спектра  $\gamma = 3,3$ ; показатель степени углового рассеивания волн  $l = 10$ . Данные параметры соответствуют развитому ветровому волнению штормовой силы и получены из предварительных численных экспериментов [5] с использованием спектральной волновой модели SWAN [6] на четырех вложенных сетках, последняя из которых соответствовала расчетной области, приведенной на рис. 1. В начальный момент времени донные осадки с диаметром частиц  $D_{50} = 5 \cdot 10^{-4}$  м и плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup> покрывали дно равномерным слоем толщиной 25 см.

Согласно 20-летним рядам данных наблюдений на океанографической платформе [7], расположенной в районе Голубого залива, наибольшей повторяемостью здесь характеризуются ветры северо-восточного и юго-западного направлений, т. е. вдольбереговые ветры. Однако наибольший разгон имеют волны, создаваемые ветрами юго-западного направления, вследствие чего они вызывают наиболее интенсивные волновые течения. Поэтому рассмотрим процессы эрозии и седиментации донных осадков, когда волны распространяются из юго-западной части Черного моря. Для сравнения изучим случай распространения волн из юго-восточной части моря, которые также имеют значительный разгон. Интегрирование по времени выполнялось в течение одних суток.

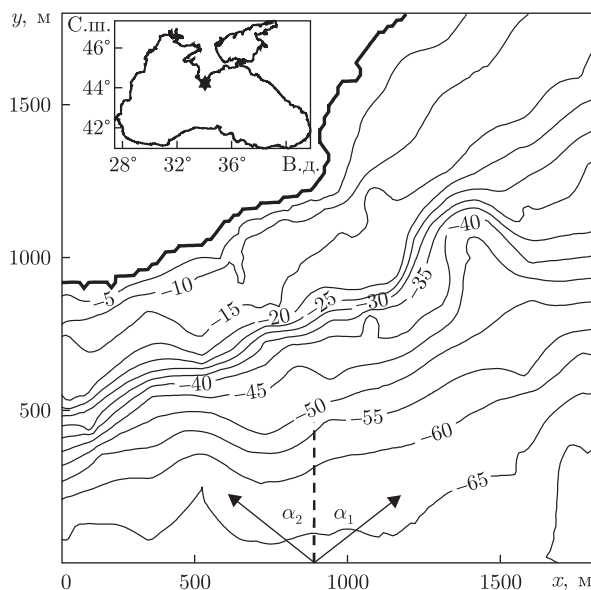


Рис. 1. Рельеф дна (м) в районе Голубого залива. Вертикальная ось направлена вверх,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — направления набегания волн.

На врезке звездочкой показано положение Голубого залива

Пространственное распределение волновых течений становится установившимся после 3 ч интегрирования. В случае набегания волн из юго-западной части Черного моря в области с глубинами более 20 м течения направлены на северо-восток (рис. 2, а) и их скорости достаточно малы (не превышают 0,01–0,02 м/с). Приведенное на рисунке а поле отражает среднюю по глубине циркуляцию вод в исследуемом районе. Между изобатами 20 и 10 м интенсивность течений существенно больше, а в распределении их направлений заметным становится влияние конфигурации береговой линии. В области с глубинами менее 10 м волновые течения приобретают характер интенсивной вдольбереговой струи с юго-запада на северо-восток со скоростью более 0,1 м/с. В Голубом заливе, вследствие его мелководности, ширина струи увеличивается, а ее интенсивность уменьшается.

При набегании волн с юго-востока интенсивного вдольберегового потока не возникает. В поле средних по глубине волновых течений образуется два циклонических круговорота к западу от Голубого залива (см. в на рис. 2). Непосредственно в самом заливе течения направлены на север и северо-восток, причем их скорости здесь достигают максимальных значений относительно всего рассматриваемого региона. Однако по величине максимальная скорость волновых течений при набегании волн с юго-востока оказывается меньше, чем в случае их распространения с юго-запада.

Интенсивность эрозионных процессов определяется величиной и пространственным распределением придонных сдвиговых напряжений. В случае набегания волн с юго-запада наибольшие по величине придонные сдвиговые напряжения имеют место в достаточно узкой прибрежной полосе. На востоке рассматриваемой области в Голубом заливе эта полоса ограничена изобатой 5 м, а на западе — изобатой 10 м. На начальном этапе эрозия начинается на глубинах до 5 м. Это приводит к увеличению концентрации донных осадков, которые вовлечены в процесс переноса волновыми течениями у дна и в толще воды. На западе придонные сдвиговые напряжения направлены практически на юг и имеют макси-

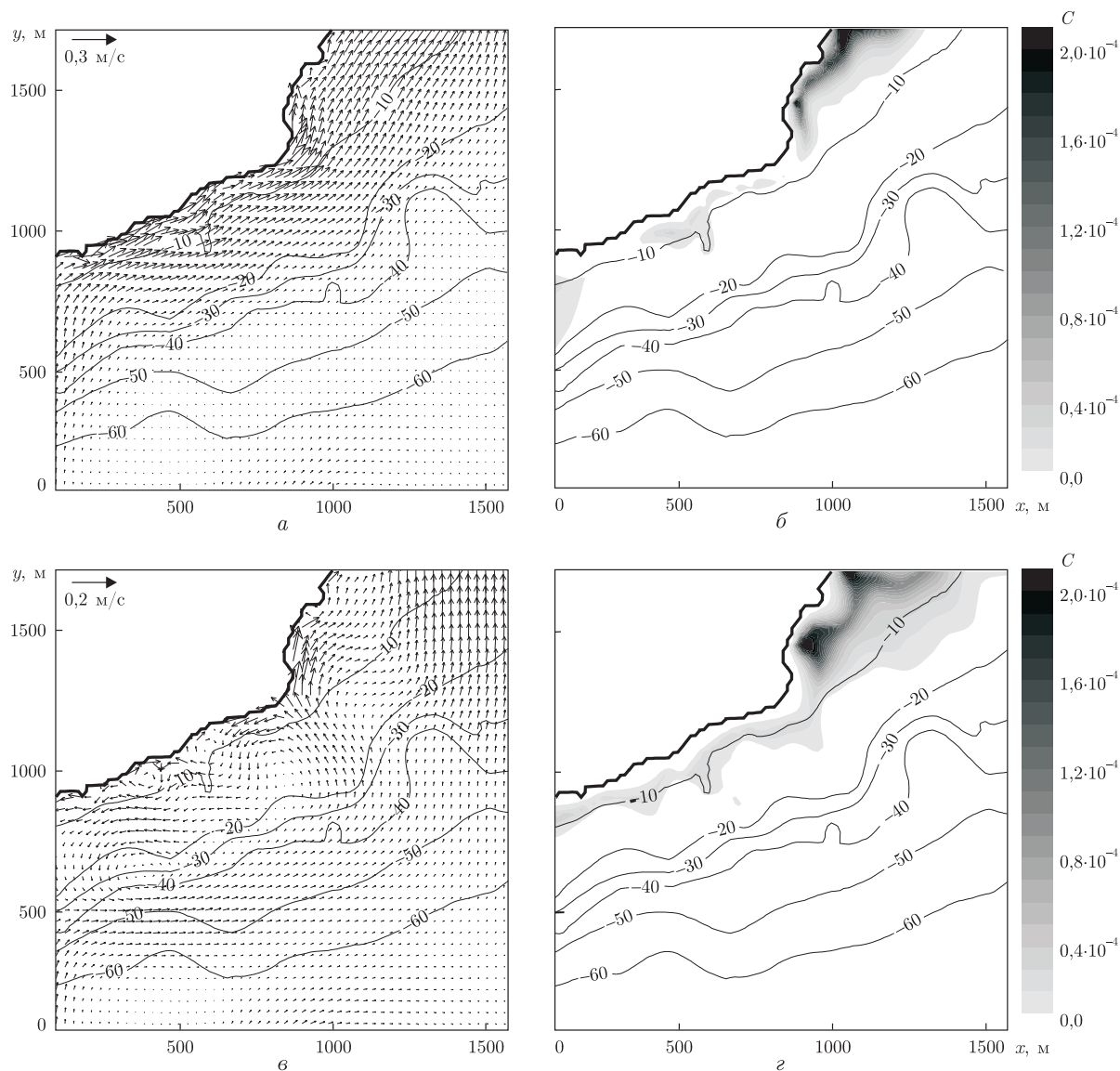


Рис. 2. Поле скоростей (м/с) средних по глубине установившихся волновых течений (а, в) и суммарная концентрация переносимых донных осадков (б, г) после 24 ч воздействия волновых течений в районе Голубого залива при набегании волн с юго-запада (а, б) и юго-востока (в, г). Изолинии глубин приведены в м

мальные величины, а в Голубом заливе у них достаточно велика восточная составляющая и их величины имеют несколько меньшие значения. Все это определяет направление и интенсивность переноса донных осадков. Вследствие более интенсивного переноса суммарная концентрация находящихся в подвижном состоянии донных осадков в западной части рассматриваемой акватории меньше, чем в восточной. При этом в первом случае область, в которой происходит перемещение осадков, значительно шире, чем во втором.

На глубинах более 5–10 м придонные сдвиговые напряжения меньше значения, необходимого для начала процесса эрозии. Здесь начинает преобладать процесс осаждения донных осадков. Поскольку скорости придонных волновых течений быстро убывают по мере уда-

ления от берега и на глубинах более 10 м становятся незначительными, то вынос донных осадков из областей эрозии редко происходит в районы с глубинами более 10 м. Это и определяет границы области последующего осадконакопления. Поскольку продолжительность процесса эрозии ограничена запасом осадков на дне, то с течением времени концентрация переносимых осадков перестает возрастать и постепенно начинает уменьшаться за счет их выноса за границы областей эрозии и последующего осаднения. После 24 ч значительная по размерам область с высокой концентрацией имеет место только в Голубом заливе, вынос осадков из которого происходил менее интенсивно, чем в западной части акватории (см. б на рис. 2).

В случае набегания волн с юго-востока придонные сдвиговые напряжения в прибрежной зоне имеют несколько большие значения, чем в случае набегания волн с юго-запада, хотя, как описано выше, для средних по глубине течений отмечается обратная закономерность. Это приводит к возникновению больших по площади областей эрозии, границы которых располагаются мористее, относительно рассмотренного случая. Причем, поскольку данные границы практически всюду совпадают с изобатой 10 м, то в Голубом заливе располагается самая обширная область эрозии. Расширение областей эрозии и наличие в поле средних по глубине течений районов, где они направлены от берега, приводят к образованию существенно больших по площади областей со значительными концентрациями перемещаемых донных осадков, чем в случае набегания волн с юго-запада (см. б и г на рис. 2).

Таким образом, для района Голубого залива Черного моря рассмотрены особенности эрозионных процессов в штормовых условиях. При набегании волн из юго-восточной части моря эрозия происходит на больших глубинах (до 10 м), чем при набегании волн с юго-запада (до 5–10 м). В первом случае преобладает перенос донных осадков вдоль берега с юго-запада на северо-восток, а во втором — существенным оказывается перенос в направлении от берега. Накопление осадков происходит мористее областей эрозии в непосредственной близости от них.

1. Блатов А. С., Иванов В. А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1992. – 244 с.
2. Иванов В. А., Фомин В. В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. – Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2008. – 363 с.
3. XBeach model description and manual. – UNESCO-IHE Institute for Water Education. – Deltares; Delft: Deltares and Delft Univ. Technology, 2010. – 106 p.
4. Черкесов Л. В., Иванов В. А., Хартиев С. М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
5. Михайличенко С. Ю., Фомин В. В. Расчеты нестационарного ветрового волнения в акватории Голубого залива на основе модели SWAN // Экол. безопасность прибреж. и шельф. зон и комплекс. использование ресурсов шельфа. – 2011. – 2, вып. 25. – С. 275–280.
6. SWAN technical documentation. – Delft: Delft Univ. Technology, 2007. – 98 p.
7. Иванов В. А., Репетин Л. Н., Мальченко Ю. А. Климатические изменения гидрометеорологических и гидрохимических условий прибрежной зоны Ялты. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – 164 с.

Д. В. Алексеєв

## Моделювання транспорту донних осадків в районі Блакитної затоки Чорного моря

*Вивчено процеси ерозії й седиментації донних осадків у районі Блакитної затоки Чорного моря з використанням числової моделі XBeach (eXtreme Beach behavior), яка описує хвилі, течії, транспорт наносів і зміни рельєфу дна. Джерелом енергії для прибережних процесів було штормове хвилювання. Розглянуто випадки набігання штормових хвиль із південно-західної й південно-східної частин моря. Встановлено, що при набіганні хвиль із південно-східної частини моря ерозія відбувається на більших глибинах (до 10 м), ніж при набіганні хвиль із південного заходу (до 5–10 м). У першому випадку переважає перенесення донних осадків уздовж берега на північний схід, а в другому — істотним виявляється перенесення у напрямі від берега. Нагромадження осадків відбувається глибше областей ерозії в безпосередній близькості від них.*

D. V. Alekseev

## Simulation of the sediment transport in the region of the Blue Bay of the Black Sea

*The processes of erosion and sedimentation of bottom sediments in the region of the Blue Bay of the Black Sea are studied by using the XBeach (eXtreme Beach behavior) numerical model, which describes waves, currents, sediment transport, and bottom profile changes. Storm waves are assumed to be a source of energy for the near shore processes. The cases of waves running from the south-west and south-east parts of the sea are considered. It is obtained that when waves run from the south-east, the erosion occurs on the bigger depths (up to 10 m) than when waves run from the south-west (up to 5–10 m). In the first case, the sediment transport along the shore to the north-east dominates. In the second one, the most significant transport occurs in the direction from the shore. The deposition of sediments takes place in the deeper regions than erosion ones in the near vicinity of them.*