

УДК 551.435.3

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ОБЪЕМА ПЕСЧАНОГО ПЛЯЖА ВО ВРЕМЯ ШТОРМА

© 2025 г. И. О. Леонтьев

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: igor.leontiev@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.07.2024 г.

После доработки 30.07.2024 г.

Принята к публикации 03.10.2024 г.

Предложен подход к оценке штормовых изменений объема надводной части песчаного пляжа на базе разработанной автором модели транспорта наносов в зоне волнового заплеска. Входными параметрами модели служат средний размер песка, уклон пляжа и хронограмма высот и периодов волн на глубокой воде. Для калибровки модели использованы опубликованные данные экспериментов в волновых каналах, а верификация модели осуществлялась на базе опубликованных данных натурных наблюдений. Показано, что на профилях с развитой системой подводных валов изменения пляжа малы даже при сильных продолжительных штормах, тогда как на берегах без валов или с одним валом штормовые размывы измеряются десятками кубометров на метр берега. Из расчетов следует, что в фазе усиления шторма уклон и объем пляжа уменьшаются, а в фазе затухания, наоборот, увеличиваются, причем адаптация к внешним воздействиям происходит с определенным лагом по времени. Изменения пляжа под действием двух последовательных штормов приблизительно одинаковой силы в большей мере определяются первым из них. Среднеквадратическая ошибка расчетов лежит в пределах от 11 до 24% по отношению к средней величине зафиксированных изменений объема пляжа.

Ключевые слова: волновой заплеск, зона заплеска, транспорт наносов, сценарий шторма, размыв и намыв пляжа, уклон равновесия пляжа

DOI: 10.31857/S0030157425010138, **EDN:** DPCMKU

ВВЕДЕНИЕ

Морской пляж представляет собой элемент прибрежного рельефа, выполняющий функцию защиты берега от штормовых воздействий. В результате трансформации и обрушения волн в прибойной зоне у береговой черты формируется поток заплеска, обладающий значительными скоростями. Его энергия поглощается, главным образом, надводной частью пляжа, расположенной выше среднего уровня воды. В процессе воздействия заплеска объем пляжа может как уменьшаться, так и увеличиваться в зависимости от фазы штормового цикла. При усилении шторма, как правило, доминирует размыв, а во время его затухания возможно частичное или полное восстановление. Иногда потери пляжевого материала превышают критическую отметку и становятся необратимыми, что приводит к прогрессирующей деградации берега в целом [5, 21].

Таким образом, прогноз итоговых изменений объема пляжа за период штормового цикла или их серии является весьма актуальной проблемой.

Это определяет значительный интерес к исследованию динамических процессов в зоне заплеска и их моделированию [10–13]. В настоящее время известно несколько моделей динамики пляжа, нацеленных на практическое применение [16, 18, 24]. Их обзор и сравнение на базе экспериментов в волновых каналах приведены в работе [14]. Там же предложен усовершенствованный вариант наиболее подходящей, по мнению авторов, модели [18], которая в целом правильно воспроизводит изменения профиля и объема пляжа, зафиксированные в лабораторных условиях при постоянных параметрах волнового воздействия. Однако пока не проведено сравнение расчетов с натурными данными, и возможность применения данной модели к реальным штормовым условиям с переменными характеристиками волнения остается под вопросом.

Цель настоящей работы заключается в обосновании достаточно простого способа прогноза изменений объема надводной части песчаного пляжа под воздействием заданного шторма,

включающего фазы усиления, максимума и затухания. В основу положена разработанная автором модель транспорта наносов в зоне волнового заплеска [1, 20], в которую введен ряд дополнительных опций. Изменения объема пляжа определяются с помощью закона сохранения массы. Параметры модели калибруются на основе опубликованных данных экспериментов в волновых каналах. Результаты расчетов сравниваются с опубликованными данными натурных наблюдений, в ходе которых фиксировались сценарии штормов и соответствующие итоговые изменения пляжа.

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИ

Динамика зоны волнового заплеска

Зона заплеска включает надводную и подводную части, ограниченные соответственно высотой заплеска R и некоторой глубиной h_s (рис. 1а).

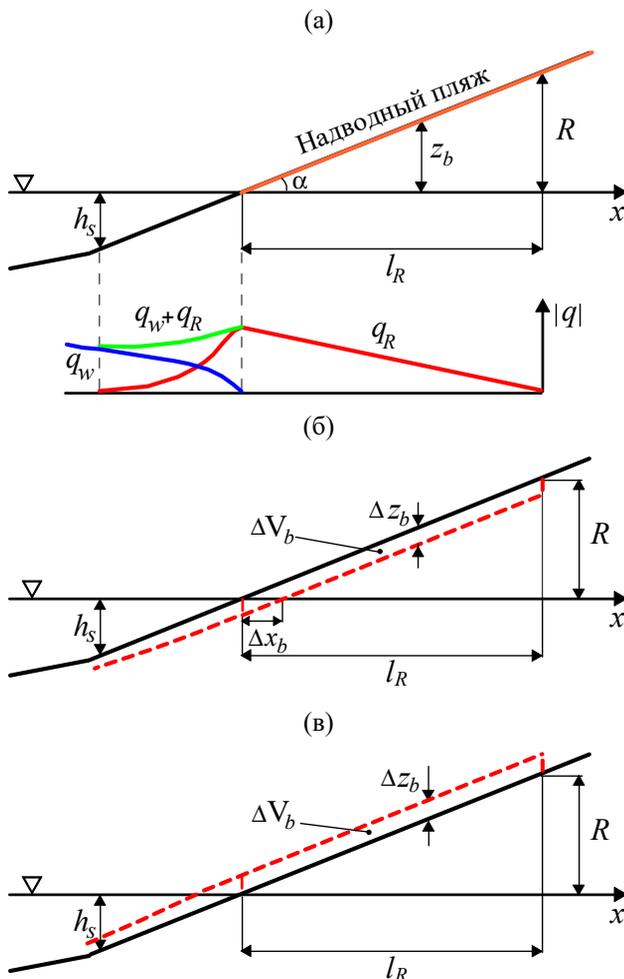


Рис. 1. Схема пляжа и распределение расходов наносов в зоне заплеска (а); деформации пляжа в условиях размыва (б) и аккумуляции (в). Обозначения в тексте.

Предполагается, что расход наносов q_R в зоне заплеска достигает максимального значения \hat{q}_R на урезе воды, а с приближением к границам зоны его абсолютная величина уменьшается и стремится к нулю. В целях упрощения допускаем, что в надводной части пляжа расход уменьшается линейно, $q_R = \hat{q}_R \frac{l_R - x}{l_R}$, т.е. с постоянным градиентом $\frac{dq_R}{dx} = -\frac{\hat{q}_R}{l_R}$. Здесь x – горизонтальное расстояние, которое отсчитывается в сторону берега, $l_R = R/\beta$ – протяженность надводной части зоны заплеска, $\beta = \tan \alpha$ – средний уклон пляжа, где угол α предполагается достаточно малым ($\cos \alpha = 1$).

Из закона сохранения массы имеем

$$\frac{dz_b}{dt} = -\frac{dq_R}{dx}. \quad (1)$$

Следовательно, возвышение пляжа z_b в течение времени Δt изменяется на величину

$\Delta z_b = \frac{\hat{q}_R}{l_R} \Delta t$, а изменения объема надводного пляжа составляют

$$\Delta V_b = \Delta z_b l_R = \hat{q}_R \Delta t. \quad (2)$$

В подводной части зоны заплеска величина q_R уменьшается до нуля. Однако здесь уже действует транспорт наносов q_w , обусловленный волновыми механизмами, и величины q_R и q_w суммируются (рис. 1а). Волновые механизмы обеспечивают транспортировку наносов с пляжа на подводный склон при размыве или в обратном направлении в условиях аккумуляции. Что касается глубины h_s , соответствующей нижней границе зоны заплеска, то она рассматривается как функция параметров волн [1, 2] или высоты заплеска [14].

Схемы на рисунках 1б и в отражают ситуации размыва и намыва пляжа. Границы областей деформаций условно показаны вертикальными линиями, хотя на самом деле уклоны дна здесь должны быть близки к уклону естественного откоса (для песка около 0.6).

Итоговые изменения объема надводного пляжа V_b за период штормового цикла T_w подсчитываются суммированием значений ΔV_b для всех последовательных временных шагов:

$$V_b = \sum_{i=1}^N \Delta V_{bi}, \quad N = T_w / \Delta t. \quad (3)$$

Шаг Δt временного ряда, характеризующего изменения волновых параметров в течение шторма, принимался равным 3–6 ч.

Ключевым элементом модели является расход наносов \hat{q}_R , который определяется в следующем разделе.

Формула расхода наносов

Поток заплеска характеризуется возвратно-поступательными движениями массы воды по поверхности пляжа. Полагая, что твердые частицы здесь перемещаются в основном путем сальтации, применим известную формулу Бэгнольда [9] для расхода влекаемых наносов:

$$q_R^+ = \frac{\varepsilon_b (\tau u)^+}{\tan \phi + \beta}, q_R^- = \frac{\varepsilon_b (\tau u)^-}{\tan \phi - \beta}. \quad (4)$$

Здесь расходы q_R^+ и q_R^- , выраженные в единицах погруженного веса наносов, относятся к прямому и обратному потокам заплеска, $\varepsilon_b \approx 0.1$ – коэффициент эффективности транспорта наносов, τ – донное касательное напряжение, u – скорость течения, $\tan \phi \approx 0.6$ – коэффициент трения твердых частиц при горизонтальном сдвиге, β – уклон дна. Величины $(\tau u)^+$ и $(\tau u)^-$ выражают скорости диссипации энергии в прямом и обратном потоках, причем $(\tau u)^+ + (\tau u)^- = (\tau u)_m$, где $(\tau u)_m$ – суммарные потери мощности за период цикла заплеска. Очевидно, для симметричного потока мы имели бы $(\tau u)^+ = (\tau u)^- = \frac{1}{2}(\tau u)_m$. Однако скорости прямого потока превышают скорости обратного течения [7], и потери мощности также асимметричны,

$$(\tau u)^+ = \frac{1}{2}(\tau u)_m(1 + a), (\tau u)^- = \frac{1}{2}(\tau u)_m(1 - a)$$

($a < 1$ – мера асимметрии). Теперь соотношения (4) записываются в виде

$$q_R^+ = \frac{\varepsilon_b}{2 \tan \phi} (\tau u)_m \frac{1 + a}{1 + b}, q_R^- = \frac{\varepsilon_b}{2 \tan \phi} (\tau u)_m \frac{1 - a}{1 - b}, \quad (5)$$

$$b = \frac{\beta}{\tan \phi},$$

а результирующий расход $\hat{q}_R = q_R^+ - q_R^-$ определяется как

$$\hat{q}_R = \frac{\varepsilon_b}{\tan \phi} (\tau u)_m (a - b) \quad (6)$$

(предполагается, что $b^2 \ll 1$).

Как видно, $\hat{q}_R = 0$, если $a - b = 0$ или $a \tan \phi - \beta = 0$. Так как нулевое значение \hat{q}_R соответствует устойчивому (равновесному) состоянию дна, то величину $a \tan \phi$ можно интерпретировать как равновесный уклон пляжа β_{eq} . Это позволяет записать $a - b = \beta_{eq} - \beta$. Если уклон пляжа больше равновесного ($\beta_{eq} - \beta < 0$), то материал выносится на подводный склон ($\hat{q}_R < 0$),

а в случае $\beta_{eq} - \beta > 0$ наносы поступают на пляж ($\hat{q}_R > 0$).

Масштаб скорости потока заплеска охарактеризуем величиной $u_R = \sqrt{2gR}$, где g – ускорение силы тяжести, R – высота заплеска над штилевым уровнем (рис. 1а). Поскольку $\tau \sim \rho u^2$, то $(\tau u)_m \sim \rho u_R^3$. В итоге объемный расход наносов, выраженный в м³/(м с), определится из (6) как

$$\hat{q}_R = K_R \mu \rho (2gR)^{3/2} (\beta_{eq} - \beta),$$

$$\mu = [g(\rho_g - \rho)(1 - p)]^{-1}. \quad (7)$$

Здесь K_R – калибровочный параметр модели порядка 10^{-3} , включающий все постоянные коэффициенты. С помощью множителя μ погруженный вес наносов переводится в их объем, ρ – плотность воды, ρ_g – плотность твердых частиц, p – пористость наносов.

Для определения высоты заплеска используем известную формулу [22], которая основана на натуральных данных и может быть записана в форме [6]:

$$R = \left(0.385\beta + 0.55\sqrt{0.563\beta^2 + 0.004} \right) \times \sqrt{H_{s0} L_0} \cos^{1/4} \Theta_0, \quad (8)$$

где H_{s0} и $L_0 = \left(\frac{g}{2\pi}\right) T_p^2$ – значительная высота и длина волн на глубокой воде (T_p – период пика спектра волн), Θ_0 – угол между лучом волны и нормалью к берегу (при $\Theta_0 < 45^\circ$ влияние угла подхода волн практически мало заметно).

Для оценки равновесного уклона пляжа возьмем за основу известную формулу [23], включив в нее калибровочный коэффициент K_β порядка 1:

$$\beta_{eq} = 0.12 K_\beta \left(\frac{T_p \sqrt{gd_g}}{H_{sB}} \right)^{0.5}, \quad (9)$$

где d_g – средний размер частиц песка, H_{sB} – высота волн на глубине обрушения h_B . Последняя соответствует обрушению волн 1% обеспеченности [3],

$$h_B = \left(\frac{1}{4\pi\gamma_B^2} \right)^{0.4} H_{1\%0}^{0.8} (gT_p^2)^{0.2} \left(\frac{\cos \Theta_0}{\cos \Theta_B} \right)^{0.4}, \quad (10)$$

где Θ_B – угол подхода волн на глубине обрушения, а индекс обрушения $\gamma_B = \frac{H_{1\%B}}{h_B} = 0.8$. При рэлеевском распределении высот волн имеем

$H_{1\%B} \approx 1.5H_{SB}$, а значит, H_{SB} связано с h_B соотношением $H_{SB} \approx 0.53h_B$.

*Адаптация морфологии
к внешним воздействиям*

В ходе шторма морфология пляжа адаптируется к внешним воздействиям, что в свою очередь, влияет и на сами воздействия. Благодаря обратной связи между морфологией и гидродинамикой, морфодинамическая система стремится к равновесию. В контексте нашей модели это означает, что начальный уклон пляжа β_0 должен стремиться к значению β_{eq} . Эта ситуация описывается уравнением вида

$$\frac{d\beta}{dt} = \lambda(\beta_{eq} - \beta), \quad (11)$$

где величина λ характеризует скорость процесса. Из решения данного уравнения следует, что через интервал времени Δt уклон пляжа достигает значения

$$\beta(\Delta t) = \beta_{eq} - (\beta_{eq} - \beta_0)e^{-\lambda\Delta t}. \quad (12)$$

Чтобы упростить задачу, в дальнейших расчетах используем среднее за время Δt значение уклона, определяемое как

$$\bar{\beta} = \frac{1}{2}(\beta_0 + \beta(\Delta t)). \quad (13)$$

Как показано в работе [19], динамика пляжа тесно связана с эволюцией подводного вала в зоне обрушения волн, и временной масштаб морфологических изменений в обоих случаях должен быть примерно одинаков. Установлено, что объ-

ем вала при воздействии волн изменяется в соответствии с зависимостью, аналогичной (11), причем величина λ параметризуется в форме

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\Omega_s^{1/2}}, \quad \Omega_s = \frac{H_{s0}}{wT_p}, \quad (14)$$

где Ω_s – параметр Дина, w – скорость осаждения твердых частиц (зависящая от их размера), а величина λ_0 оценивается на основе экспериментов в волновом канале как 0.15 ч^{-1} [19]. В дальнейшем, допуская соответствие скоростей морфологических изменений пляжа и подводного вала, будем использовать при расчетах соотношения (14).

**КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ
ЛАБОРАТОРНЫХ ОПЫТОВ**

Для калибровки модели использовались опубликованные данные экспериментов в волновых каналах, которые отражены в табл. 1. В ходе опытов нерегулярные волны с постоянными параметрами воздействовали на первоначально линейные песчаные профили. В [15] и [26] приведены графики профилей дна до и после волнового воздействия, на основе которых были подсчитаны изменения объема надводного пляжа $V_b^{(m)}$, а в [14] указаны непосредственно измеренные значения $V_b^{(m)}$.

В ходе калибровки выяснилось, что значения коэффициента K_R в формуле расхода (7) отличаются для условий размыва и аккумуляции.

Таблица 1. Условия экспериментов в волновых каналах и сравнение измеренных ($V_b^{(m)}$) и расчетных ($V_b^{(c)}$) изменений объема надводного пляжа

Тест	d_g , мм	β_0	H_{s0} , м	T_p , с	T_w , ч	$V_b^{(m)}$, м ³ /м	$V_b^{(c)}$, м ³ /м
Профили размыва							
Delft20 [26]	0.13	0.050	0.167	2.33	24	-0.06	0.08
Delft15 [26]	0.13	0.067	0.167	2.33	24	-0.11	-0.16
Delft10 [26]	0.13	0.100	0.167	2.33	24	-0.25	-0.80
Barc15 [26]	0.25	0.067	0.53	4.1	22.9	-1.1	-1.15
Hann15 [26]	0.27	0.067	0.97	5.6	32.8	-4.4	-4.48
Wise1 [15]	0.25	0.067	0.47	3.7	4.0	-0.20	-0.30
115E1 [14]	0.25	0.067	0.45	3.5	3.0	-0.19	-0.21
115E2 [14]	0.25	0.067	0.55	3.5	3.0	-0.48	-0.30
SB0 [14]	0.33	0.067	0.80	6.0	20	-2.75	-2.35
Профили аккумуляции							
115A1 [14]	0.25	0.067	0.25	5.2	10	0.20	0.13
125A1 [14]	0.25	0.040	0.25	5.2	10	0.20	0.97
SBA1 [14]	0.33	0.067	0.60	12	6	0.28	0.23

В результате оптимальные значения коэффициентов были определены следующим образом:

$$K_{\beta} = 0.65,$$

$$K_R = \begin{cases} 0.0015, & \beta_0 > \beta_{eq}, \text{ размыв} \\ 0.002, & \beta_0 < \beta_{eq}, \text{ аккумуляция} \end{cases} \quad (15)$$

Расчетные изменения объема пляжа $V_b^{(c)}$ приведены в последней графе табл. 1. Сравнение их с данными наблюдений показано на рис. 2. Среднеквадратичная ошибка расчетов

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_j (V_{bj}^{(m)} - V_{bj}^{(c)})^2}{n}}$$

составляет $0.31 \text{ м}^3/\text{м}$ (n – общее количество тестов).

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ ДАННЫХ

Выделяются два типа песчаных берегов, один из которых характеризуется развитой системой подводных валов, а берега второго типа обнаруживают либо один вал, либо вовсе их не имеют. Штормовые изменения пляжа, наблюдаемые на берегах второго типа, существенно больше [2]. Поэтому имеет смысл провести верификацию модели отдельно для каждого типа берега. Далее используются опубликованные материалы наблюдений, в которых зафиксированы хронограммы штормов (изменения параметров H_s и T_p во времени), а также профили дна до начала и после окончания шторма.

Следует отметить, что штормовые воздействия сопровождались колебаниями уровня за счет прилива и нагона, которые не включались в расчеты. Направление волн также могло изменяться в течение шторма, но из-за отсутствия сведений об этом в использованных источниках, волнения рассматривались как нормальные к берегу. Неучтенные факторы могли приводить к дополнительным ошибкам расчетов.

Берега с системой подводных валов

Условия наблюдений и результаты тестирования модели отражены в табл. 2. В графе «Шторм»

Таблица 2. Условия наблюдений на берегах с развитой системой подводных валов и итоговые штормовые изменения объема пляжей по наблюдениям ($V_b^{(m)}$) и расчетам ($V_b^{(c)}$)

Профиль	d_g , мм	β_0	Шторм	T_w , ч	Δt , ч	$V_b^{(m)}$, $\text{м}^3/\text{м}$	$V_b^{(c)}$, $\text{м}^3/\text{м}$
Duck-82 [17]	1.0	0.080	Dec-82	192	6	-10^0	-2.3
Duck-84 [17]	1.0	0.089	Apr-84	72	3	10^0	-1.5
Skallingen [8]	0.2	0.042	Oct-95	78	3	-10^0	-1.1
Egmond [25]	0.3	0.022	Oct-98	168	3	$\pm 10^0$	-3.1

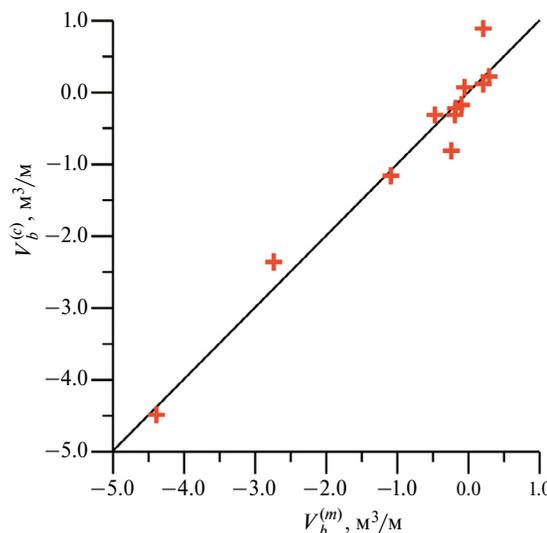


Рис. 2. Изменения объема пляжа по данным опытов в волновых каналах ($V_b^{(m)}$) и по результатам расчетов ($V_b^{(c)}$) при использовании принятых значений калибровочных коэффициентов согласно (15).

указано имя файла волнения, соответствующее времени наблюдений (месяц и год). Далее отмечены продолжительность шторма T_w и временной шаг Δt , с которым проводились расчеты. Значения $V_b^{(m)}$ оценивались на основе сравнения графиков начального и конечного профилей берега, зафиксированных до и после шторма. Уклон β_0 определялся как отношение максимального возвышения пляжа к его ширине.

Вид профилей до и после шторма показан на рис. 3. Профили Duck относятся к атлантическому побережью США, а профили Skallingen и Egmond – к датскому и голландскому берегам Северного моря. На профилях Duck средний размер песка в надводной части пляжа варьировал от 0.2 до 2 мм [17], и в качестве репрезентативного значения было принято $d_g = 1 \text{ мм}$.

Рис. 4а отражает зафиксированные сценарии штормов. На рис. 4б показаны расчетные изменения объема пляжа и его уклона в ходе шторма. Как видно, в фазе усиления волнения размыв увеличивается, а уклон пляжа уменьшается. При затухании волн объем и уклон пляжа стремятся к до-штормовому состоянию.

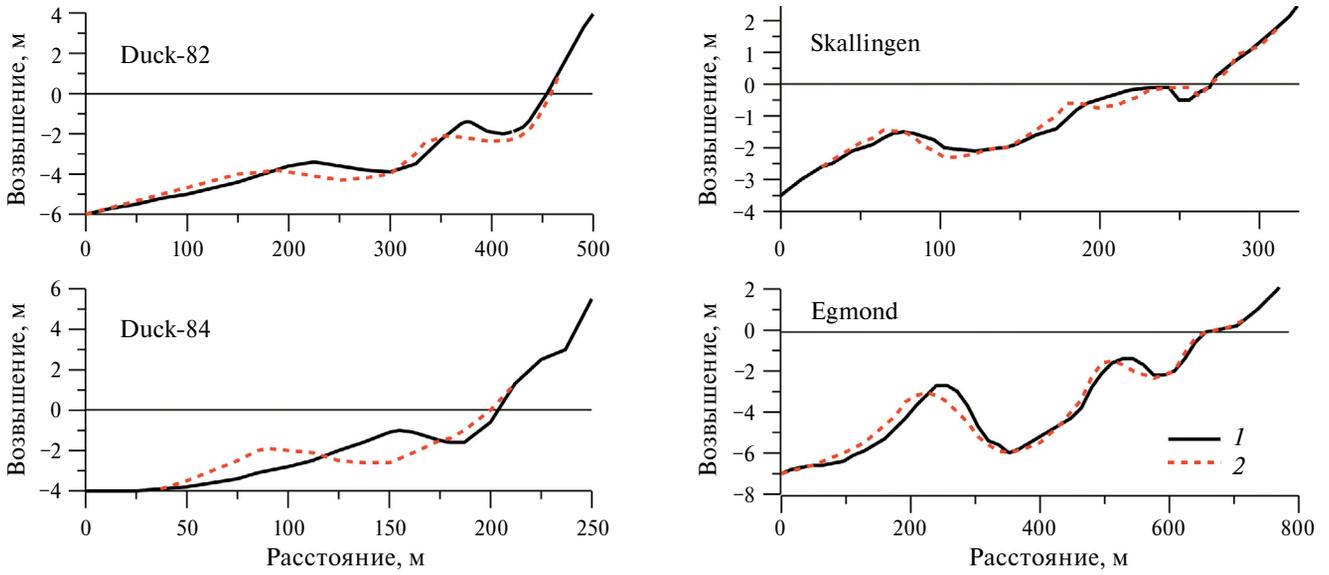


Рис. 3. Береговые профили с системами подводных валов перед штормом (1) и после его окончания (2) по данным [8, 17, 25].

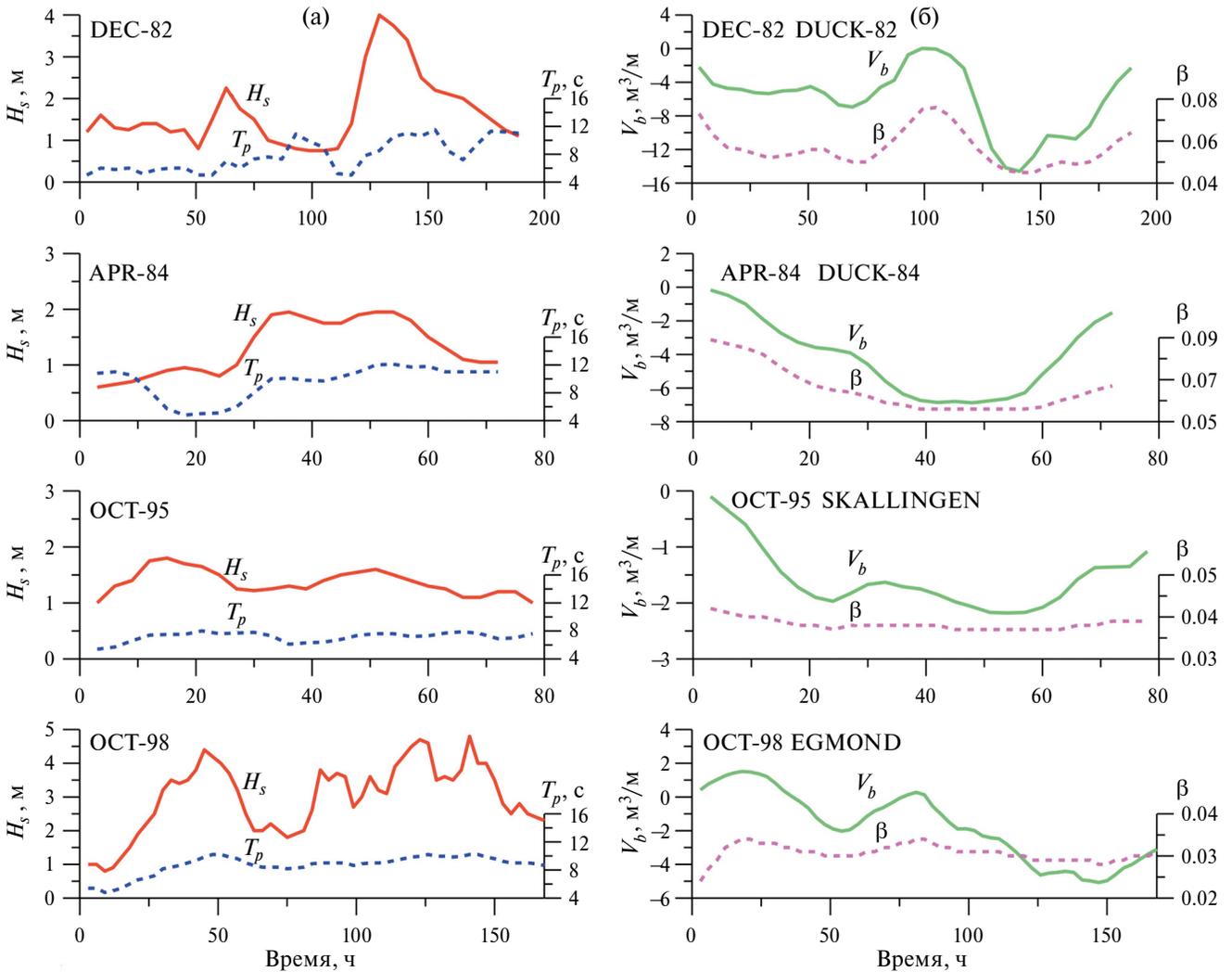


Рис. 4. Хронограммы штормов (а) и соответствующие расчетные изменения объема и уклона пляжа (б) на берегах с системами подводных валов.

Из табл. 2 и рис. 3 следует, что наблюдавшиеся итоговые штормовые деформации пляжа весьма малы. Расчетные величины $V_b^{(c)}$ также не выходят за пределы первых кубометров на метр длины берега, т.е. оказываются того же порядка, что и зафиксированные изменения объемов $V_b^{(m)}$.

Берега без подводных валов или с одним валом

Источником данных для тестирования модели послужило исследование [27], в котором приводятся хронограммы штормов и соответствующие деформации профилей дна, наблюдавшиеся на различных участках атлантического побережья США. Условия и результаты выполненных наблюдений характеризует табл. 3.

Рассматриваемые берега сложены среднезернистым песком и характеризуются уклонами пляжа $0.04 \div 0.08$. Изменения объема надводного пляжа $V_b^{(m)}$ определялись путем сравнения графи-

ков береговых профилей до и после шторма, примеры которых показаны на рис. 5.

Как видно из табл. 3, штормовые деформации пляжей измеряются десятками кубометров на метр берега, что на порядок больше, чем в условиях берегов с мульти-валовыми системами.

Сценарии штормов, обозначенных в табл. 3, показаны на рис. 6а, а соответствующие хронограммы изменений объема и уклона пляжа представлены на рис. 6б. Как видно, шторма вызывают значительный размыв пляжа во время фазы роста волн, который не компенсируется аккумуляцией при затухании волнения.

Как показали расчеты, для условий размыва пляжа калибровочный коэффициент K_R , определяемый соотношением (15), должен быть увеличен вдвое. Иначе говоря, в случае $\beta_0 > \beta_{eq}$ при расчетах величин $V_b^{(c)}$, приведенных в табл. 3 и на рис. 6б, использовалось значение $K_R = 0.003$.

Таблица 3. Условия наблюдений на берегах без подводных валов или с одним валом [27] и итоговые штормовые изменения объема пляжей по наблюдениям ($V_b^{(m)}$) и расчетам ($V_b^{(c)}$)

Профиль	d_g , мм	β_0	Шторм	T_w , ч	Δt , ч	$V_b^{(m)}$, м ³ /м	$V_b^{(c)}$, м ³ /м
M1	0.40	0.060	Mar-84	192	6	-36	-34.8
M9	0.40	0.060	Mar-84	192	6	-25	-34.8
P8	0.40	0.075	Mar-84	192	6	-40	-45.1
DEB	0.35	0.042	Sep-89	60	3	-45	-32.7
MYB	0.35	0.050	Sep-89	60	3	-42	-36.5
OC37	0.35	0.075	Oct-91	174	3	-32	-33.3
DB100	0.33	0.067	Dec-92	144	3	-50	-26.1
RB214	0.35	0.080	Dec-92	144	3	-48	-39.3

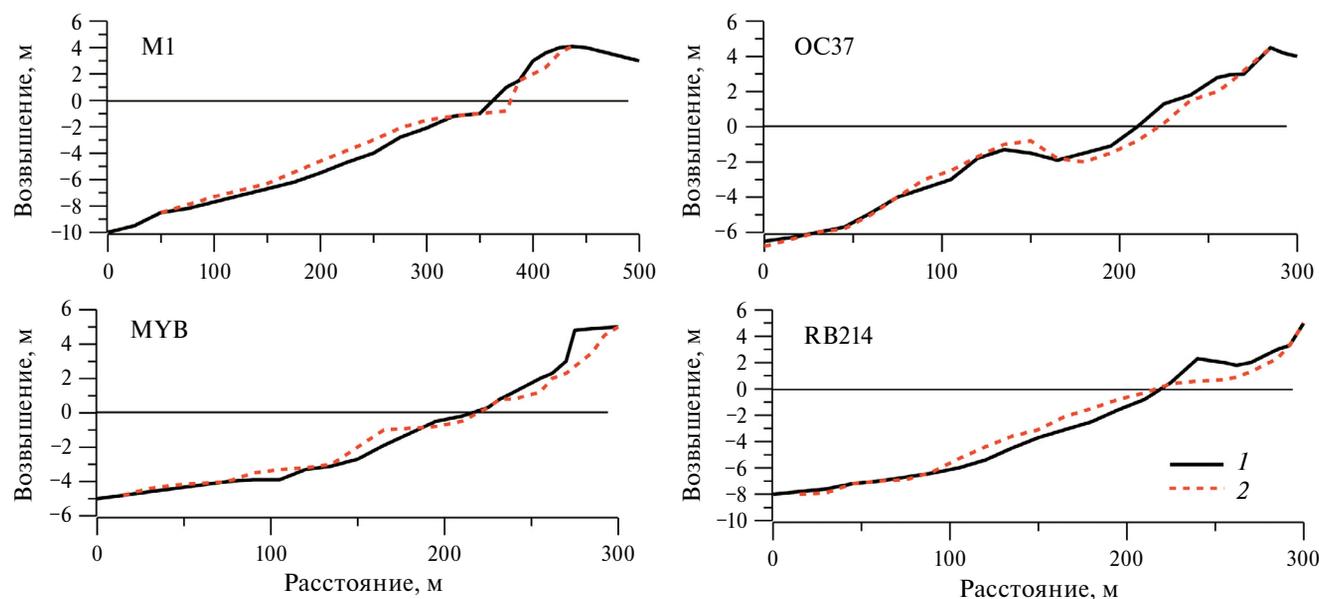


Рис. 5. Примеры береговых профилей без валов или с одним валом до (1) и после шторма (2) по данным [27].

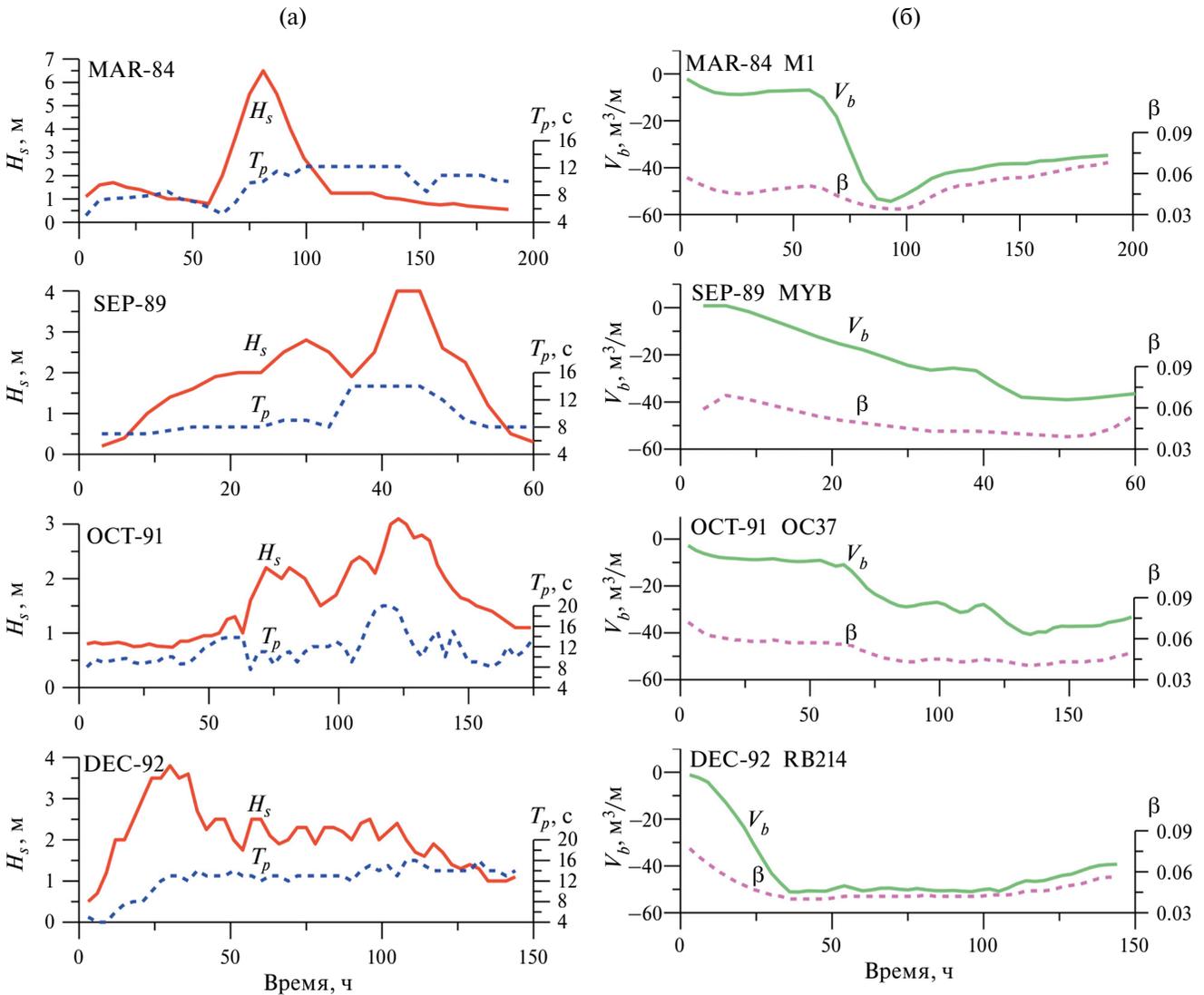


Рис. 6. Хронограммы штормов (а) и расчетные изменения объема и уклона пляжа (б) на берегах без подводных валов или с одним валом.

Среднеквадратичная ошибка расчетов при этом составила $RMSE = 9.6 \text{ м}^3/\text{м}$, что соответствует 24% от среднего зафиксированного изменения объема пляжа.

Результат двух последовательных штормов

В работах [27] и [28] приводятся данные об объемах размыва на побережье Оушен-Сити (штат Мэриленд) под действием двух последовательных штормов, случившихся в ноябре 1991 и январе 1992 гг. (Nov-91 и Jan-92) и имевших продолжительность 96 и 90 ч соответственно. На основе синтеза этих данных построена табл. 4, в которой отражены характеристики пляжа и итоговые изменения его объема, зафиксированные на ряде профилей. Здесь же приведены расчетные объемы размыва отдельно для первого и второго штормов ($V_{b1}^{(c)}$ и $V_{b2}^{(c)}$), а также их сумма ($V_b^{(c)}$).

Профили дна в Оушен-Сити характеризуются одним подводным валом, и их примером может служить профиль OC37, представленный на рис. 5.

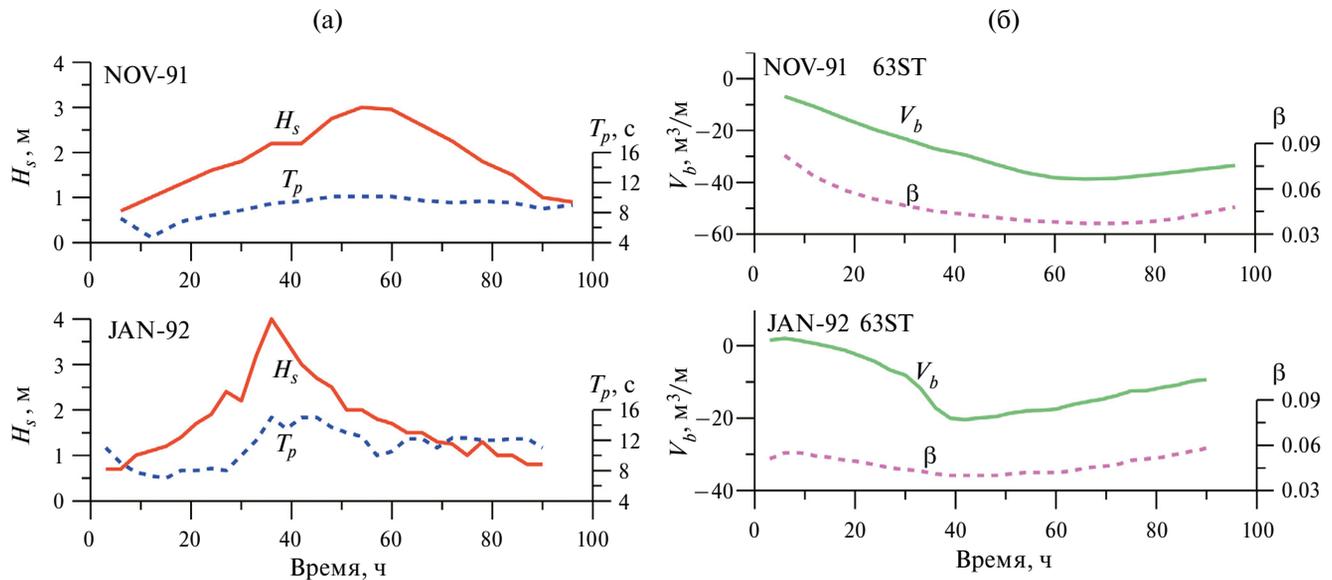
На рис. 7а показаны сценарии последовательных штормов Nov-91 и Jan-92, а рис. 7б отражает расчетные изменения объема и уклона пляжа для профиля 63St. На остальных профилях изменения V_b и β имеют аналогичный характер.

При расчетах второго шторма начальный уклон пляжа принимался равным уклону, сформированному первым штормом. В ситуациях $\beta_0 > \beta_{eq}$, как и прежде, использовалось значение калибровочного коэффициента $K_R = 0.003$.

Из табл. 4 и рис. 7б следует, что основной вклад в размыв пляжа был внесен первым штормом. Сформированный им уклон пляжа оказался достаточно близким к оптимальному значению.

Таблица 4. Наблюдавшиеся и расчетные изменения объема пляжа в результате воздействия двух последовательных штормов (данные наблюдений [27, 28])

Профиль	d_g , мм	β_0	$V_b^{(m)}$, м ³ /м	$V_{b1}^{(c)}$, м ³ /м	$V_{b2}^{(c)}$, м ³ /м	$V_b^{(c)}$, м ³ /м
37St	0.33	0.08	-48	-29.7	-9.5	-39.2
52St	0.35	0.09	-46	-35.2	-9.5	-44.7
63St	0.37	0.09	-44.8	-33.5	-9.4	-42.9
74St	0.38	0.09	-50.0	-32.8	-9.7	-42.5
103St	0.40	0.09	-42.4	-31.3	-9.1	-40.4
124St	0.40	0.09	-40.1	-31.3	-9.1	-40.4

**Рис. 7.** Хронограммы штормов (а) и расчетные изменения объема и уклона пляжа (б) для двух последовательных штормов Nov-91 и Jan-92.

В результате объем материала, вынесенный вторым штормом, составил лишь около четверти всего объема размыва.

Расчетные и измеренные итоговые объемы размыва удовлетворительно согласуются друг с другом. Среднеквадратичная ошибка расчетов оценивается величиной $RMSE = 4.9 \text{ м}^3/\text{м}$, что составляет 11% от среднего значения объема размыва.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из ключевых параметров рассматриваемой модели является уклон пляжа. Его оптимальное значение уменьшается с ростом высоты волн. Поэтому при развитии шторма уклон имеет тенденцию уменьшаться, что поддерживается выносом материала пляжа на подводный склон. В фазе затухания шторма уклон стремится увеличиться, что достигается транспортировкой дополнительных количеств материала с подводного склон на берег. Однако адаптация пляжа к внеш-

ним воздействиям происходит с определенным лагом по времени. Эта особенность моделируется в нашей модели с помощью алгоритма, предложенного Ларсоном и др. [19] для прогноза изменений объема подводного вала в зоне обрушения. Временные масштабы обоих процессов, по-видимому, близки друг к другу.

Тестирование модели на базе лабораторных экспериментов показывает, что рекомендуемое сочетание калибровочных коэффициентов K_β и K_R обеспечивает приемлемое согласие расчетов с данными наблюдений. Величины K_R для условий размыва ($\beta_0 > \beta_{eq}$) оказываются несколько меньше, чем для условий аккумуляции ($\beta_0 < \beta_{eq}$).

Найденные значения коэффициентов K_β и K_R применимы и к природным пляжам, но не для всех типов прибрежной морфологии. Тестирование модели на основе натуральных данных приводит к выводу, что скорость размыва пляжа существенно зависит от типа берегового профиля.

Профили с развитой системой подводных валов демонстрируют сравнительно слабые изменения пляжа даже в условиях сильных и продолжительных штормов. Однако на берегах без валов или с одним валом штормовые размывы измеряются десятками кубометров на метр берега. Это различие должно учитываться при расчетах путем использования разных значений калибровочного коэффициента K_R . Его величина может быть охарактеризована следующим образом:

$\beta_0 < \beta_{eq}$, аккумуляция: $K_R = 0.002$,

$\beta_0 > \beta_{eq}$, размыв:

$$K_R = \begin{cases} 0.0015, & \text{профиль с системой подводных валов,} \\ 0.003, & \text{профиль без валов или с одним валом.} \end{cases} \quad (16)$$

Как уже отмечалось, колебания уровня моря в ходе шторма не включались в расчет. По сути, допускалось, что средний уклон пляжа, определяемый нашей моделью, не зависит от текущей отметки среднего уровня воды. При этом подразумевалось, что уровень не достигает положения, при котором возможен перелив воды через гребень берегового вала (бермы). Моделирование ситуации перелива рассматривается, например, в работах [4] и [19].

Причиной изменений объема пляжа могут быть и градиенты вдольберегового транспорта наносов, что иллюстрируют данные, приведенные в статье [28]. Однако данный фактор, по-видимому, не играл решающей роли в примерах штормовых изменений пляжа, использованных для верификации модели. Результаты расчетов показывают удовлетворительное согласие с данными, полученными как на берегах с мульти-валовыми системами, так и на профилях без валов. В последнем случае среднеквадратичная ошибка расчетов не превышала 24% от средней величины изменений объема пляжа. А при моделировании воздействия двух последовательных штормов ошибка составила всего 11%.

Практический интерес вызывает вопрос о смещениях береговой линии во время шторма. Согласно формуле (2) и рис. 1б, за время Δt урез под воздействием волн должен переместиться на расстояние $\Delta x_b = \Delta V_b / R$. Однако для реалистичной оценки смещения берега необходимо принимать во внимание изменения объема не только надводного пляжа, но и его подводной части. Такая задача должна решаться на базе более сложной модели, включающей действие волновых механизмов и изменения профиля дна в ходе шторма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основу изложенного подхода к оценке штормовых изменений объема пляжа положена разработанная автором модель транспорта наносов в зоне волнового заплеска. Входными параметрами модели служат размер песка, уклон пляжа и сценарий шторма, включающий хронограмму высот и периодов волн.

Результирующий расход наносов на пляже представляет результат баланса между асимметрией потока заплеска и силой тяжести. Направление транспорта определяется знаком разности текущего уклона пляжа и уклона в состоянии равновесия.

Калибровка и верификация модели показывают, что процессы размыва и намыва пляжа характеризуются различной скоростью, которая зависит также и от типа берегового профиля. Так, на берегах, не имеющих подводных валов, штормовые размывы могут быть на порядок больше, чем на берегах с мульти-валовыми системами.

В ходе шторма уклон пляжа стремится к равновесному значению, которое отвечает волнению, действующему в данный момент. При усилении волнения уклон уменьшается, что сопровождается уменьшением объема пляжа за счет выноса материала на подводный склон, а при затухании шторма уклон и объем пляжа растут.

Восстановление пляжа до объема, зафиксированного перед штормом, наблюдалось только на профилях с мульти-валовыми системами и не отмечалось на профилях без валов.

В случае двух последовательных штормов приблизительно одинаковой силы основной вклад в изменения пляжа вносит первый из них.

Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными натурных наблюдений. Среднеквадратичная ошибка расчетов лежит в пределах от 11 до 24% по отношению к средней величине зафиксированных изменений объема пляжа.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0018).

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
2. Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, 2014. 251 с.

3. Леонтьев И.О. О расчете вдольберегового транспорта наносов // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 2. С. 226–232.
<https://doi.org/10.7868/S0030157414020130>
4. Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю. Моделирование штормовых деформаций песчаного берега (на примере восточной части Финского залива) // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 1. С. 147–158.
<https://doi.org/10.7868/S0030157414060069>
5. Леонтьев И.О. Оценка опасности штормовых размывов песчаного берега // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 2. С. 286–294.
<https://doi.org/10.31857/S0030157421020118>
6. Леонтьев И.О. Абразия берега, сложенного рыхлым материалом // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 125–134.
<https://doi.org/10.31857/S0030157422010087>
7. Лонгинов В.В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 379 с.
8. Aagaard T., Nielsen J., Greenwood B. Suspended sediment transport and nearshore bar formation on a shallow intermediate-state beach // *Marine Geology*. 1998. V. 148. P. 203–225.
9. Bagnold R.A. *Mechanics of marine sedimentation* // *The Sea*. V. 3. N.-Y.: Wiley, 1963. P. 507–528.
10. Baldock T., Alsina J., Cáceres I. et al. Large-scale experiments on beach profile evolution and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves // *Coastal Engineering*. 2011. V. 58. P. 214–227.
11. Blenkinsopp C.E., Turner I.L., Masselink G., Russell P.E. Swash zone sediment fluxes: field observations // *Coastal Engineering*. 2011. V. 58. P. 28–44.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.002>
12. Cáceres I., Alsina J.M. Suspended sediment transport and beach dynamics induced by monochromatic conditions, long waves and wave groups // *Coastal Engineering*. 2016. V. 108. P. 36–55.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.11.004>
13. Chardón-Maldonado P., Pintado-Patiño J.C., Puleo J.A. Advances in swash-zone research: small-scale hydrodynamic and sediment transport processes // *Coastal Engineering*. 2016. V. 115. P. 8–25.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.008>
14. Chen W., van der Werf J.J., Hulcscher S.J.M.H. Practical modelling of sand transport and beach profile evolution in the swash zone // *Coastal Engineering*. 2024. V. 191.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104514>
15. Eichentopf S., Cáceres I., Alsina J.M. Breaker bar morphodynamics under erosive and accretive wave conditions in large-scale experiments // *Coastal Engineering*. 2018. V. 138. P. 36–48.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.010>
16. Karambas T.V. Prediction of sediment transport in the swash-zone by using a nonlinear wave model // *Continental Shelf Res.* 2006. V. 26. P. 599–609.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.01.014>
17. Larson M., Kraus N.C. SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Tech. Rep. CERC-89–9. 1989. US Army Eng. Waterw. Exp. Station. Coastal Eng. Res. Center.
18. Larson M., Kubota S., Erikson L. Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling // *Mar. Geol.* 2004. V. 212. P. 61–79.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.004>
19. Larson M., Palalane J., Fredriksson C., Hanson H. Simulating cross-shore material exchange at decadal scale. Theory and model component validation // *Coastal Engineering*. 2016. V. 116. P. 57–66.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.05.009>
20. Leont'yev I.O. Numerical modelling of beach erosion during storm event // *Coastal Engineering*. 1996. V. 47. P. 413–429.
21. Leont'yev I.O., Akivis T.M. Erosion Index for Assessing Vulnerability of Sandy Beach // *Processes in GeoMedia – V. VI. Springer Geology / T. Chaplina (ed.)*. 2023. P. 19–32.
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-16575-7>
22. Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger A.H. Empirical parameterization of setup, swash, and run-up // *Coastal Engineering*. 2006. V. 53. P. 573–588.
23. Sunamura T. Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling // *Applications in coastal modeling* / Eds. Lakhani V.C., Trenhail A.S. Amsterdam: Elsevier, 1989. P. 159–213.
24. Van Rijn L.C. Prediction of dune erosion due to storms // *Coastal Engineering*. 2009. V. 56. P. 441–457.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.10.006>
25. Van Rijn L.C., Walstra D.J.R., Grasmeier B., Sutherland J., Pan S., Sierra J.P. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and season using process-based profile models // *Coastal Engineering*. 2003. V. 47. P. 295–327.
26. Van Rijn L.C., Tonnon P.K., Walstra D.J.R. Numerical modelling of erosion and accretion of plane sloping beaches at different scales // *Coastal Engineering*. 2011. V. 58. P. 637–655.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.009>
27. Wise A., Smith S.J., Larson M. SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Tech. Rep. CERC-89–9. Report 4: Cross-shore transport under random waves and model validation with supertank and field data. US Army Corps of Engineers. 1996.
28. Zheng J., Dean R.G. Numerical models and intercomparisons of beach profile evolutions // *Coastal Engineering*. 1997. V. 30. P. 169–201.

ESTIMATING OF CHANGES IN THE VOLUME OF SANDY BEACH DURING A STORM

I. O. Leont'yev

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow
e-mail: igor.leontiev@gmail.com*

An approach is proposed for predicting storm-induced changes in subaerial volume of a sandy beach based on the author's model of sediment transport in the swash zone. Input parameters in the model are the mean sand size, the slope of the beach and a chronogram of heights and periods of waves in deep water. To calibrate the model, published data from experiments in wave channels were used. Verification of the model was based on the published data from field observations. It is shown that on profiles with a developed system of nearshore bars, beach changes are small even during strong, prolonged storms, while on shores without bars or with one bar, storm erosion is measured in tens of cubic meters per meter of shore. From the calculations it follows that in the intensifying phase of the storm, the slope and volume of the beach decrease, and in the attenuation phase, on the contrary, they increase. Adaptation to external influences occurs with a certain time lag. Changes to the beach under the influence of two successive storms of approximately equal strength are largely determined by the first of them. The root mean square error of the calculations ranges from 11 to 24% relative to the average value of recorded changes in beach volume.

Keywords: wave runup, swash zone, sediment transport, storm scenario, beach erosion and accretion, equilibrium beach slope