

## К ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННОГО ПЕСЧАНОГО ПЛЯЖА

© 2022 г. И. О. Леонтьев\*

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

*\*e-mail: igor.leontiev@gmail.com*

Поступила в редакцию 20.09.2021 г.

После доработки 05.10.2021 г.

Принята к публикации 16.12.2021 г.

Предлагаются решения ряда задач, связанных с проектированием искусственного песчаного пляжа, защищающего морской берег и обеспечивающего его рекреационный ресурс. Подводная часть искусственного профиля аппроксимируется профилем равновесия Дина [13], а надводный профиль определяется с учетом высоты волнового заплеска и штормового нагона. Параметры строительной бермы определяются исходя из условия, что весь необходимый объем материал вначале размещается в надводной части берега. Подводная часть профиля со временем формируется самими волнами, о чем свидетельствуют результаты проведенного моделирования. Если расчетная ширина пляжа отличается от проектной, то она может быть скорректирована путем сдвига всего искусственного профиля на определенное расстояние. Однако при слишком больших различиях остается только выбрать иную крупность песка. Потери пляжевого материала зависят от коэффициента вдольбереговой диффузии, который определяется автором как функция годовой суммы вдольбереговых потоков наносов. Приводятся графики потерь материала в зависимости от масштабов волновых воздействий, потоков наносов и длины пляжа. Учитываются и фоновые потери за счет повышения уровня моря. Предложенный алгоритм расчетов применен к расчету искусственного пляжа для берегового участка западного Крыма. Показано, что проектный профиль берега оказывается устойчивым по отношению к сильным штормам.

**Ключевые слова:** искусственный пляж, ширина пляжа, профиль равновесия, строительная берма, потери пляжевого материала, вдольбереговые потоки наносов

**DOI:** 10.31857/S0030157422030066

### ВВЕДЕНИЕ

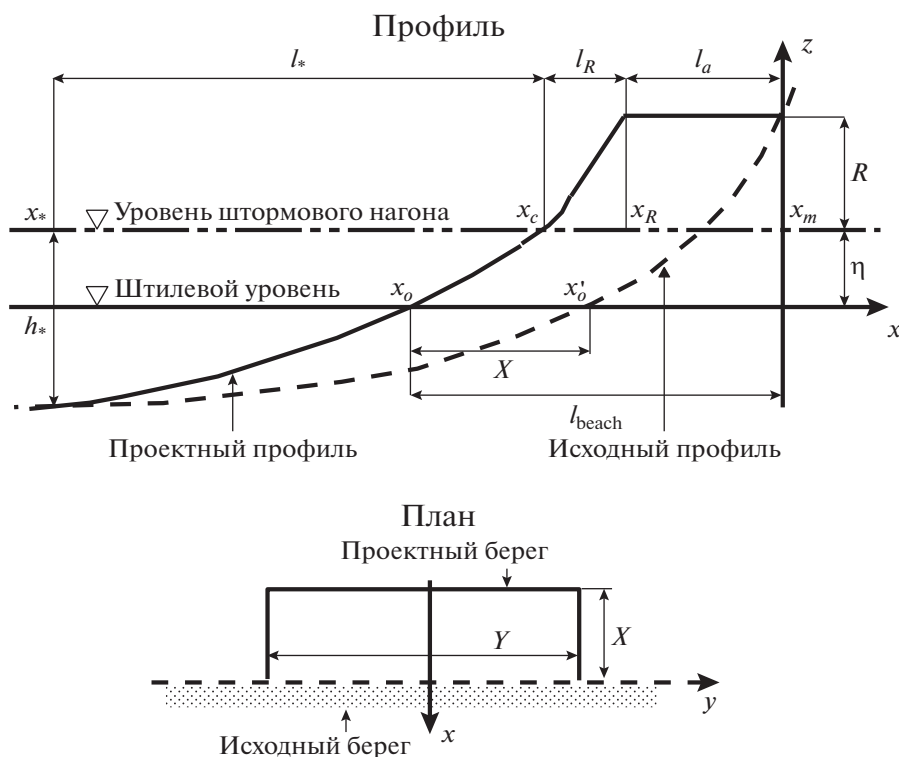
Искусственный пляж представляет своего рода чехол, надетый на естественный берег. Он прикрывает прибрежную полосу с наиболее активной гидродинамикой и защищает берег от размыва при сильных штормах, действующих на фоне штормовых нагонов. Как показывает опыт, защитный эффект пляжа в наибольшей мере проявляется тогда, когда крупность слагающего его песка не меньше, чем крупность естественных наносов на защищаемом участке берега, так как более мелкий песок обычно не удерживается на пляже и уносится на подводный склон.

При проектировании искусственного пляжа требуется ответить на ряд вопросов. Главный из них – как оценить объем материала для создания пляжа требуемой ширины, устойчивого по отношению к заданным штормовым воздействиям. Решение должно основываться на представлениях о форме и размерах искусственного профиля, отвечающего условиям равновесия, определение которых само по себе является непростой задачей.

Также актуален вопрос о потенциальных потерях материала вследствие его выноса за пределы пляжа. В качестве основного фактора здесь выступает вдольбереговой транспорт наносов, генерируемый волнами и сопутствующими течениями. Дополнительным источником потерь может служить фоновый размыв берега, например, за счет изменения относительного уровня моря.

Наконец, практически важным является вопрос о конфигурации строительной бермы. Основная часть материала, как правило, размещается в надводной части берега, что удобнее по соображениям технологии строительства. Нижняя часть профиля достраивается со временем самими волнами, которые в процессе формирования профиля равновесия переносят избыточный материал с пляжа на подводный склон. Параметры бермы должны определяться с учетом этих процессов.

Все эти вопросы в той или иной мере рассматривались ранее [10, 12, 13, 19], что однако не исключает потребность дальнейших проработок в данной области. Настоящая работа также нацеле-



**Рис. 1.** Схема искусственного пляжа. Основные обозначения:  $l_a$  – ширина бермы,  $l_R$  – ширина зоны волнового заплеска,  $l_*$  – протяженность подводной части искусственного профиля,  $l_{\text{beach}}$  – ширина надводного пляжа,  $X$  – выдвигание береговой линии,  $\eta$  и  $R$  – высоты штормового нагона и волнового заплеска,  $h_*$  – глубина замыкания,  $Y$  – протяженность пляжа вдоль берега.

на на поиск решений обозначенных проблем. В ней уточняется и дополняется концепция, изложенная в прежнем исследовании автора [5], и предлагается соответствующий алгоритм расчета искусственного пляжа. Полученные результаты иллюстрируются примером практического применения к сегменту берега западного Крыма.

### ИСКУССТВЕННЫЙ ПРОФИЛЬ

Основание проектного профиля пляжа располагается на глубине  $h_*$ , маркирующей область значимых штормовых деформаций дна. Иначе говоря, искусственный и естественный профили совмещаются в некоторой точке  $x_*$ , где полная глубина с учетом штормового нагона равна  $h_*$  (рис. 1).

Проектный профиль включает три участка –  $l_*$ ,  $l_R$  и  $l_a$ . Участок  $l_*$  характеризует подводную часть между точками  $x_*$  и  $x_c$ , где  $x_c$  – положение уреза при штормовом уровне (рис. 1). Профиль глубин  $h(x)$  здесь аппроксимируется профилем равновесия Дина [12, 13],

$$h = A(x_c - x)^{2/3}, \quad (1)$$

где  $A$  – функция размера твердых частиц (порядка  $10^{-1} \text{ м}^{1/3}$ ).

Участок  $l_R$  характеризует ширину зоны волнового заплеска (между точками  $x_c$  и  $x_R$ ), а участок  $l_a$  соответствует ширине бермы, т.е. расстоянию между точками максимального уровня  $x_R$  и  $x_m$  на искусственном и естественном профилях соответственно (рис. 1). Размеры участков выражаются соотношениями:

$$l_* = \left( \frac{h_*}{A} \right)^{3/2}, \quad l_R = R/\beta, \quad l_a = x_m - x_R, \quad (2)$$

где  $R$  – высота заплеска,  $\beta$  – равновесный уклон пляжа.

Важнейшими показателями являются расстояние  $l_{\text{beach}}$  между урезом и бережной границей искусственного профиля, а также расстояние  $X$  между положениями уреза проектного и исходного профилей:

$$l_{\text{beach}} = x_m - x_0, \quad X = x'_0 - x_0. \quad (3)$$

Первое характеризует ширину надводной части искусственного пляжа, а второе – величину выдвигания береговой линии (рис. 1).

Полная высота искусственного профиля составляет  $(h_* + R)$ , а максимальное возвышение пляжа относительного штилевого уровня равно сумме высот штормового нагона  $\eta$  и заплеска, т.е.  $(\eta + R)$ . Возвышения  $z$  проектного профиля относительно штилевого уровня выражаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} x_* \leq x \leq x_c, \quad z &= \eta - A(x_c - x)^{2/3}, \\ x_c \leq x \leq x_R, \quad z &= \eta + \beta(x - x_c), \\ x_R \leq x \leq x_m, \quad z &= \eta + R. \end{aligned} \quad (4)$$

Объем материала  $V$  на единицу длины берега ( $\text{м}^3 \text{ м}^{-1}$ ), необходимый для строительства пляжа, определяется как

$$V = \int_{x_*}^{x_m} (z - z') dx, \quad (5)$$

где  $z'$  – возвышение фактического профиля.

### РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Параметр  $A$  увеличивается с крупностью наносов согласно зависимости, представленной Дином в табличной форме [13]. Эта зависимость может быть выражена аналитически в виде

$$A = 0.069 \ln d_g + 0.21, \quad (6)$$

где средний размер твердых частиц  $d_g$  выражен в мм. Соотношение (6) применимо к терригенным песчаным наносам в диапазоне  $0.1 < d_g \leq 1$  мм. В случае биогенного кораллового песка параметр  $A$  оценивается по формуле [15]

$$A = 0.16d_g^{0.22}. \quad (7)$$

Дальнейшие расчеты основываются на параметрах заданного шторма, характеризуемого значительной высотой волн на глубокой воде  $H_{s0}$ , ассоциированным периодом  $T_s$  и нагоном  $\eta$ . Высота волнового заплеска определяется по известной формуле [17], которую можно представить в виде

$$R = (0.385\beta + 0.55\sqrt{0.563\beta^2 + 0.004})\sqrt{H_{s0}L_0}, \quad (8)$$

где  $L_0 = \frac{g}{2\pi} T_s^2$  – длина волн на глубокой воде.

Для оценки равновесного уклона пляжа  $\beta$  используется зависимость [18]:

$$\beta = 0.12 \left( \frac{T_s \sqrt{g d_g}}{H_{sB}} \right)^{0.5}, \quad (9)$$

где  $H_{sB}$  – значительная высота волн на глубине обрушения  $h_B$ . Последняя отвечает обрушению

волн с высотой 1% обеспеченности, достигающей отношения к глубине  $\gamma_B = H_{1\%B}/h_B = 0.8$ . При условии постоянства потока энергии глубина обрушения определяется как [3, 4]:

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

где  $H_{1\%0}$  – высота волн 1% обеспеченности на глубокой воде,  $\Theta_0$  и  $\Theta_B$  – углы подхода волн относительно нормали к берегу на глубокой воде и в точке обрушения. В случае рэлеевского распределения высот волн  $H_{1\%} = 1.52H_s$  и  $H_{sB} = 0.53h_B$ .

Глубина  $h_*$ , замыкающая область значимых штормовых деформаций, трактуется различным образом. Традиционный подход связывает глубину замыкания с высотой штормовых волн  $H_{s012}$ , характеризующейся превышением не более 12 ч в году [14]. Автором получена следующая формула:

$$h_* = \bar{K} H_{s012}, \quad \bar{K} = \left[ b_1 \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{-4/15} + b_2 \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{4/55} \right], \quad (11)$$

где коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  зависят от заданного порога деформаций дна  $\Delta h_c$  [7]. Допустим, нас интересует граница прибрежной области, в которой деформации дна превышают величину  $\Delta h_c = 0.1$  м. В этом случае  $b_1 = 0.32$ ,  $b_2 = 0.99$ , и при характерной крутизне штормовых волн  $H_0/L_0 = 0.03-0.04$  глубина замыкания составляет  $(1.5-1.6) H_{s012}$ .

С другой стороны, проект пляжа может быть ориентирован на противостояние экстремальному шторму с периодом повторяемости порядка ряда лет. В этом случае, поскольку наблюдаемые деформации дна по большей части ограничиваются пределами прибойной зоны, эквивалентом глубины замыкания может служить глубина обрушения волн:  $h_* = h_B$ . Таким образом, величина  $h_*$  оценивается по формулам (10) или (11) в зависимости от условий задачи.

### ПАРАМЕТРЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ БЕРМЫ

В пределах искусственного профиля выделяются две области – подводный склон и надводный пляж. Условной границей между ними служит положение штилевого уреза  $x_0$  (рис. 1). Объемы материала  $V_1$  и  $V_2$  в соответствующих областях определяются как

$$V_1 = \int_{x_*}^{x_0} (z - z') dx, \quad V_2 = \int_{x_0}^{x_m} (z - z') dx, \quad (12)$$

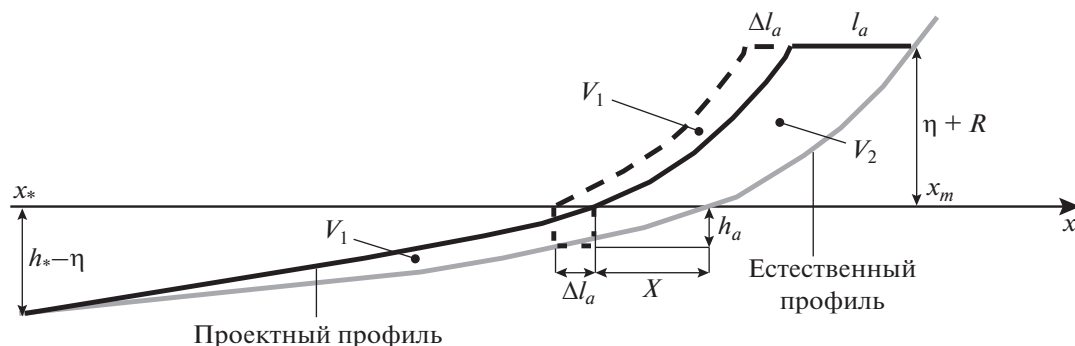


Рис. 2. Схема профиля строительной бермы. Обозначения в тексте.

где  $z$  и  $z'$  – возвышения проектного и фактического профилей соответственно.

При создании искусственного пляжа строительный материал, как уже отмечалось, чаще всего концентрируется в надводной части берега, и объем строительной бермы должен быть равен полному объему пляжа  $V$ , т.е.  $V = V_1 + V_2$ . Прибавление объема  $V_1$  к объему  $V_2$  надводной части практически означает необходимость расширения бермы в сторону моря на некоторую величину  $\Delta l_a$ , что поясняет рис. 2.

Чтобы оценить величину  $\Delta l_a$  представим, что  $V_1$  соответствует объему песчаного тела шириной  $\Delta l_a$  и высотой  $(h_a + \eta + R)$ , где  $h_a$  – глубина у внешнего края бермы (рис. 2). Глубину  $h_a$ , в свою очередь, можно выразить как  $h_a = \bar{s}(X + \Delta l_a)$ , где  $\bar{s}$  – средний уклон прибрежной части естественного профиля дна, а  $X$  – расстояние между положениями уреза исходного и проектного профилей. В результате приходим к квадратному уравнению:  $\Delta l_a^2 + \left(\frac{\eta + R}{\bar{s}} + X\right)\Delta l_a - \frac{V_1}{\bar{s}} = 0$ , решение которого определяет искомое приращение ширины бермы:

$$\Delta l_a = -\frac{p}{2} + \sqrt{\frac{p^2}{4} + \frac{V_1}{\bar{s}}}, \quad p = \frac{\eta + R}{\bar{s}} + X. \quad (13)$$

Как уже отмечалось, важным показателем пляжа является расстояние  $X$ , определяющее выдвижение береговой линии. Возможна ситуация, когда при заданных исходных параметрах расчетная величина  $X$  оказывается либо меньше, либо больше желаемого значения  $X_D$ . Иначе говоря,  $X_D = X + \Delta X$ , и чтобы достичь требуемой величины  $X_D$ , необходимо сдвинуть весь профиль на расстояние  $\Delta X$  либо в сторону моря, либо в сторону берега. В первом случае для строительства пляжа потребуется больший объем песка, во втором – меньший.

Сдвиг профиля в ту или иную сторону будет сопровождаться увеличением или уменьшением глубины в точке пересечения с естественным профилем, поскольку дно наклонное (рис. 2). Однако если уклон мал, а сдвиг  $\Delta X$  не слишком велик, то изменением глубины можно пренебречь. Тогда изменения объема профиля в первом приближении составят  $\Delta V = (h_* + R)\Delta X$ . Увеличение или уменьшение объема строительной бермы на ту же величину  $\Delta V$  должно вызывать увеличение или уменьшение ее ширины на соответствующую величину  $\Delta l'_a$ , что выражается равенством  $\Delta V = (h_a + \eta + R)\Delta l'_a$ . В результате изменение ширины бермы, обусловленное сдвигом профиля на расстояние  $\Delta X$ , определится как

$$\Delta l'_a = \frac{h_* + R}{h_a + \eta + R} \Delta X. \quad (14)$$

Таким образом, размеры строительной бермы по линии спокойного уровня  $l_{b1}$  и по линии максимального возвышения  $l_{b2}$  в общем случае должны составить

$$l_{b1} = X + \Delta l_a + \Delta l'_a, \quad l_{b2} = l_a + \Delta l_a + \Delta l'_a. \quad (15)$$

Средний уклон фронтального склона бермы близок к равновесному уклону пляжа  $\beta$ .

На рис. 2 подводный профиль бермы условно показан вертикальной линией. В действительности он должен иметь наклон, приблизительно соответствующий углу естественного откоса (для песка около  $30^\circ$ ).

## ОЦЕНКА ПОТЕРЬ МАТЕРИАЛА

Искусственный пляж представляет собой возмещение береговой линии с поперечным размером  $X$  и длиной вдоль берега  $Y$  (рис. 1). Потери материала связаны, главным образом, с вдольбереговым выносом песка за пределы пляжа. Соответствующие изменения положения береговой

линии  $x_0$  описываются уравнением сохранения массы в форме [2, 16]

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = \frac{\partial Q / \partial y}{h_* + R}, \quad (16)$$

где  $t$  – время,  $Q$  – интегральный расход наносов вдоль берега, который можно представить в виде  $Q = \hat{Q} \sin 2\Theta_B$ . Допуская, что градиент  $\partial Q / \partial y$  обусловлен главным образом изменением угла подхода волн  $\frac{\partial \Theta_B}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \arctg \frac{dx_0}{dy} \right) = \frac{\partial^2 x_0}{\partial y^2}$  и полагая  $\cos 2\Theta_B \approx 1$ , приходим к уравнению диффузии,

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = G \frac{\partial^2 x_0}{\partial y^2}, \quad G = \frac{2\hat{Q}}{h_* + R}, \quad (17)$$

где  $G$  – коэффициент диффузии. Дин [13] на основе решения уравнения (17) получил зависимость, описывающую уменьшение объема пляжа  $V(t)$  со временем,

$$\frac{V(t)}{V_0} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{Gt}}{Y}, \quad (18)$$

где  $V_0$  – первоначальный объем.

Величину  $\hat{Q}$  в выражении для  $G$  в (17) можно интерпретировать как виртуальный расход наносов при угле подхода волн  $\Theta_B = 45^\circ$ . Благодаря рефракции, волны подходят к точке обрушения под значительно меньшими углами  $\Theta_B$ , а значит, величина  $\hat{Q}$  существенно больше, чем реальный расход наносов  $Q$ . Иначе говоря,  $\hat{Q} = pQ$ , где  $p > 1$ . Переходя к среднегодовым показателям, можно записать  $\hat{Q} = \bar{p}Q_\Sigma$ , где  $Q_\Sigma$  – суммарная емкость потоков наносов ( $\text{м}^3/\text{год}$ ),  $\bar{p}$  – усредненная величина  $p$ . Сравнение с имеющимися оценками  $G$  показывает, что типичные значения  $\bar{p}$  попадают в интервал от 2 до 3. Тогда  $G$  ( $\text{м}^2/\text{год}$ ) в первом приближении определится как

$$G = \frac{5Q_\Sigma}{h_* + R}. \quad (19)$$

Зависимость (18) с учетом (19) представлена графически на рис. 3 для двух характерных случаев. Первый (рис. 3а) отвечает умеренной волновой активности (высота активного профиля  $h_* + R = 4$  м) и небольшим потокам наносов (от 10 до 50 тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$ ), типичным для закрытых морских заливов, крупных озер и водохранилищ. Второй случай (рис. 3б) соответствует открытым морским побережьям с более высокой энергетикой ( $h_* + R = 8$  м), где суммарные потоки  $Q_\Sigma$  достигают значений от 100 до 500 тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Как видно на рис. 3, потери ускоряются с увеличением емкости потока наносов и замедляются с ростом протяженности искусственного пляжа. Очевидно, не имеет смысла создание короткого пляжа, так как даже при умеренных волновых воздействиях он исчезнет через 10–20 лет. Более протяженный пляж (2 км) может продержаться несколько десятков лет. Однако на открытых берегах с достаточно высокой волновой активностью подобный срок службы достигается только при протяженности пляжа не менее 4 км.

Суммарная годовая емкость потоков наносов  $Q_\Sigma$  рассчитывается как

$$Q_\Sigma = \sum_j \left( \sum_i |Q_i| t_{wi} \right)_j, \quad (20)$$

где  $t_w$  – продолжительность действия данного расхода  $Q$  (в часах в год), а индексы  $i$  и  $j$  относятся к данной высоте волн и их направлению соответственно. Расход  $Q$ , выраженный в  $\text{м}^3/\text{ч}$ , можно определить по формуле [3, 4]

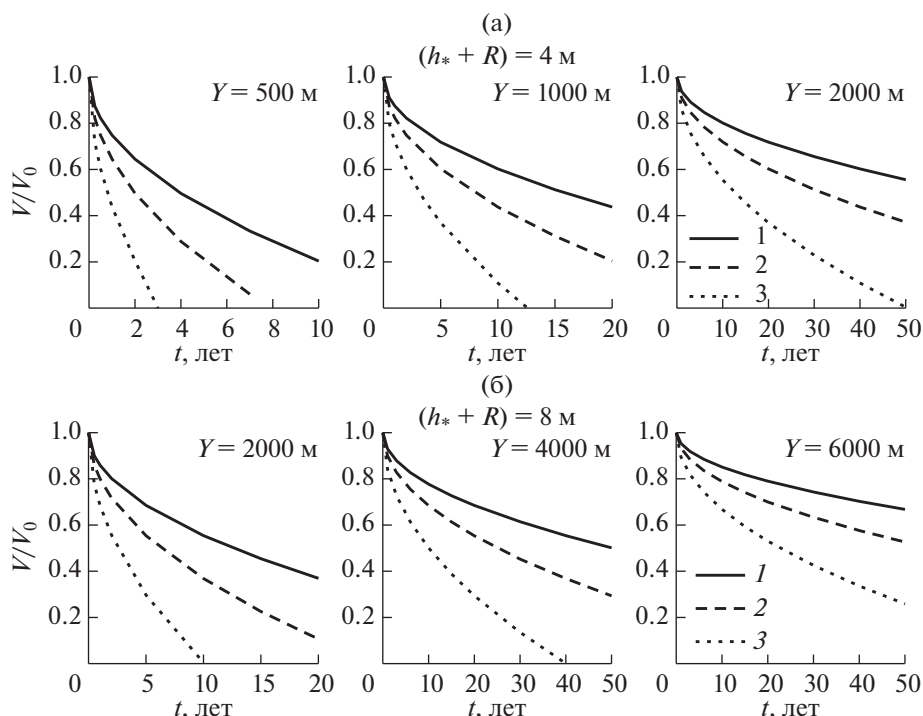
$$Q = 0.005\mu_h \left( 0.8 + 0.02 \frac{\sqrt{gh_B}}{w_g} \right) \times H_{rmsB}^2 \sqrt{gh_B} \sin \Theta_B \cos \Theta_B, \quad (21)$$

где  $\mu_h = 3600 [(\rho_g/\rho - 1)(1 - \sigma)]^{-1}$ ,  $\rho_g/\rho$  – отношение плотности твердых частиц к плотности воды,  $\sigma$  – пористость песчаного грунта,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $w_g$  – скорость осаждения твердых частиц (гидравлическая крупность),  $H_{rmsB}$  – среднеквадратичная высота в точке обрушения ( $H_{rmsB} = \sqrt{2}H_{sB}$ ). Расход может быть положительным или отрицательным в зависимости от направления волн относительно береговой нормали, характеризуемого углом  $\Theta_B$ . Последний рассчитывается на основе закона рефракции  $\sin \Theta / C = \text{const}$ , где  $C$  – скорость распространения волн.

Еще одной причиной потерь материала может быть повышение относительного уровня моря, обусловленное изменениями климата и тектоническим погружением прилегающей суши. Рост уровня провоцирует размыв пляжа и вынос песка на подводный склон. Согласно правилу Брууна [11], скорость отступления берега  $\frac{\Delta x_0}{\Delta t}$  и объем ежегодных потерь песка  $\Delta V_\zeta$  оцениваются как

$$\frac{\Delta x_0}{\Delta t} = \frac{l_*}{h_* + R} \frac{\Delta \zeta}{\Delta t}, \quad \Delta V_\zeta = l_* \Delta \zeta, \quad (22)$$

где  $\Delta \zeta$  – величина изменения уровня моря.



**Рис. 3.** Уменьшение со временем относительного объема искусственного пляжа  $V/V_0$  в зависимости от его длины  $Y$  и суммарной емкости вдольбереговых потоков наносов  $Q_\Sigma$ , согласно зависимостям (18)–(19): (а) – условия глубоко врезаемых морских заливов, сравнительно крупных озер и водохранилищ (высота активного профиля  $h_* + R = 4$  м) при значениях  $Q_\Sigma$ : (1) – 10, (2) – 20, (3) – 50 тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$ ; (б) – условия открытых морских берегов (высота активного профиля  $h_* + R = 8$  м) при значениях  $Q_\Sigma$ : (1) – 100, (2) – 200, (3) – 500 тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$ .

## ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

**Природные условия объекта.** Проиллюстрируем полученные результаты примером, относящимся к участку берега западного Крыма, расположенного между оз. Донузлав и г. Евпатория. По сообщениям СМИ, здесь планируется строительство нового курортного кластера, в том числе, создание рекреационной пляжной зоны протяженностью около 5 км. В настоящее время берег характеризуется песчаным пляжем шириной от 10 м до 30 м и дюной высотой 2–2.5 м. Песча-

**Таблица 1.** Суммарная годовая продолжительность характерных волнений, подходящих к берегу с различных направлений (по данным [9])

$H_{s0}$ , м	$T_s$ , с	$t_w$ , ч				
		ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0.4	4.6	666	526	552	482	403
1.1	5.2	359	315	464	359	315
1.9	6.1	61.3	70.0	193	131	114
2.7	7.2	4.38	10.5	61.3	35.0	26.3
3.4	8.3	–	1.75	17.5	6.13	4.38
4.2	9.4	–	–	3.50	0.88	–

ный слой продолжается до глубин 2–3 м, а далее располагается известняковый бенч. Весь район испытывает дефицит наносов [1, 8]. Обустройство рекреационной зоны в этих условиях, очевидно, невозможно без создания искусственного пляжа. Далее попытаемся определить его возможные параметры.

Обобщенный сглаженный профиль берега, характерный для рассматриваемого района, показан на рис. 4а (кривая 1). Так как доминирует среднезернистый песок (известняковый детрит с примесью ракуши), то для искусственного пляжа следует использовать либо средний, либо крупный песчаный материал. В дальнейших расчетах будем ориентироваться на размер твердых частиц  $d_g = 0.5$  мм.

Волновой режим у берегов западного Крыма отражает табл. 1, составленная по данным справочника [9], где отражены суммарные за год продолжительности ( $t_w$ ) волнений разной силы для волноопасных румбов.

**Параметры искусственного пляжа.** Глубина замыкания принята как граница области штормовых деформаций дна более 0.1 м. Исходные данные и результаты расчетов приведены в табл. 2, где представлены два варианта. В первом из них урез выдвинут на расстояние  $X = 20$  м, что следу-

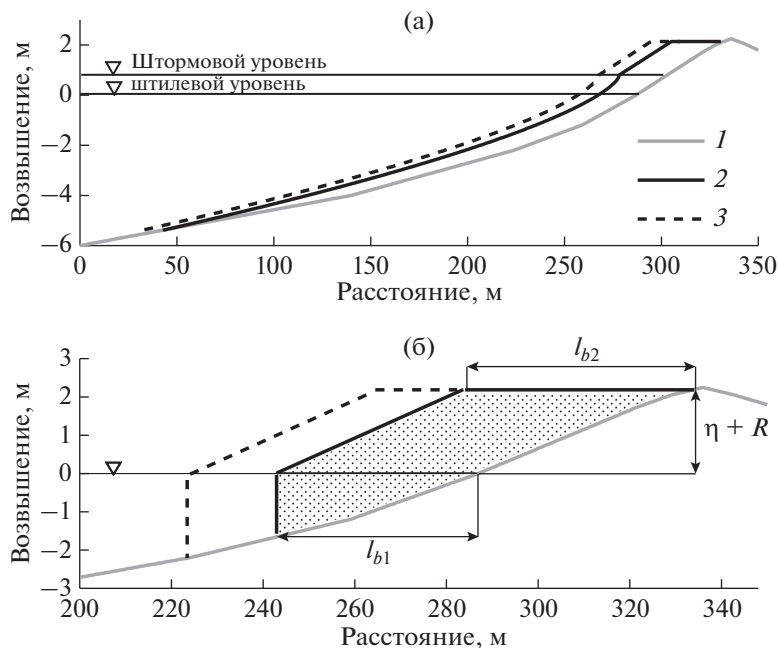


Рис. 4. (а) – Профили берега: (1) – естественный, (2) и (3) – искусственные профили при выдвигании уреза на 20 (2) и 30 м (3). (б) – Естественный берег (1) и профили строительной бермы при выдвигании уреза на 20 (2) и 30 м (3).

ет непосредственно из расчетов по исходным данным. Во втором варианте с целью расширения пляжа весь профиль сдвинут в сторону моря, и выдвигание берега увеличено до 30 м. Вид соответствующих профилей показан на рис. 4а (кривые 2 и 3).

Как видно из табл. 2, при расширении пляжа объем строительного материала возрастает с 153 до 231 м<sup>3</sup>/м. Общий объем песка для 5-километрового пляжа составит 0.8 и 1.2 млн. м<sup>3</sup> для первого и второго варианта соответственно. Профили строительной бермы показаны на рис. 4б.

Для оценки морфологических изменений строительной бермы в ходе ее волновой переработки было проведено моделирование воздействия 2-суточного умеренного шторма (на базе модели CROSS-PB [6]). Результаты, представленные на рис. 5а, показывают, что материал бермы, как и ожидалось, распределяется по подводному склону, а формирующийся профиль (кривая 2) приближается к проектному (кривая 3).

На рис. 5б представлен результат моделирования воздействия сильного шторма на искусственный профиль. Очевидно, пляж не претерпевает

существенных изменений и в целом остается устойчивым.

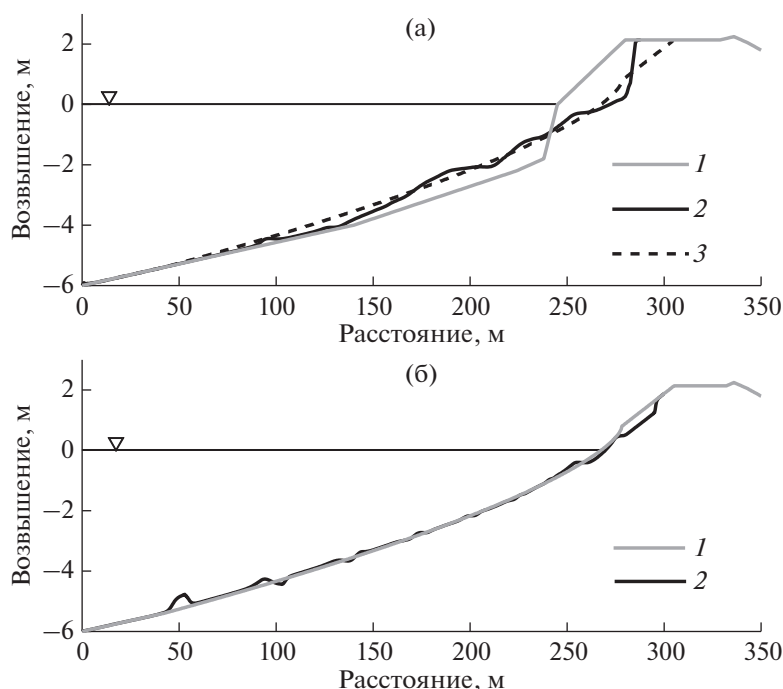
**Потери материала.** Потенциальные потери определяются, главным образом, емкостью вдольбереговых потоков наносов  $Q_{\Sigma}$ . Результаты расчетов  $Q_{\Sigma}$  по формулам (20) и (21) при использовании данных табл. 1 приведены в табл. 3. Береговая линия рассматриваемого побережья ориентирована вдоль направления СЗ–ЮВ, так что волны ЮЗ румба распространяются перпендикулярно берегу (угол  $\Theta_0 = 0$ ) и не создают вдольбереговой перенос. ЮВ и СЗ волнения действуют параллельно берегу ( $\Theta_0 = \pm 90^\circ$ ), но в силу рефракции способны достигать прибрежной полосы и перемещать наносы (в этих случаях при расчетах использовались значения  $\Theta_0 < 90^\circ$ ). Основной вклад в продольный транспорт песка вносят южные и западные волнения с углами подхода  $\Theta_0 = \pm 45^\circ$ .

В табл. 3 отражены суммарные годовые потоки наносов для каждого румба, а также их алгебраическая сумма, представляющая результирующий поток  $Q_{net}$ . Последний, как видно, невелик и на-

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчетов искусственного пляжа

$d_g$ , мм	$H_{s012}$ , м	$T_{s012}$ , с	$\eta$ , м	$R$ , м	$h_k$ , м	$\beta$	$X$ , м	$l_{beach}$ , м	$V$ , м <sup>3</sup> /м	$l_{b1}$ , м	$l_{b2}$ , м
0.5	4.0	9.0	0.8	1.34	6.2	0.05	20	64	153	44	50
							30	74	231	64	70





**Рис. 5.** Моделирование штормовых воздействий: (а) – на строительную берму, (1) – начальный профиль, (2) – после 2-суточного умеренного шторма ( $H_{s0} = 1.7$  м,  $T_s = 6.0$  с,  $\eta = 0.4$  м), (3) – проектный профиль. (б) – на искусственный пляж, (1) – начальный профиль, (2) – после 12-часового сильного шторма ( $H_{s012} = 4.0$  м,  $T_{s012} = 9.0$  с,  $\eta = 0.5$  м).

правлен на юго-восток. Суммарная емкость потоков  $Q_{\Sigma}$  составляет 70 тыс. м<sup>3</sup>/год. Приблизительная оценка потерь материала на основе графиков рис. 3б показывает, что за 10 лет объем пляжа уменьшится примерно на 15%, а через 50 лет будет утрачено около 40% его объема.

Следует также принять во внимание, что рассматриваемый берег испытывает тектоническое погружение, и общее повышение относительного уровня оценивается как 2 мм/год [1]. Согласно (22), это должно приводить к отступанию берега на 0.1 м/год и ежегодным потерям песка около 0.6 м<sup>3</sup>/м, что при длине пляжа 5 км соответствует убыли 3 тыс. м<sup>3</sup>/год. Таким образом, за 50-летний период сумма всех потерь может превысить половину первоначального объема пляжа, и для его сохранения, очевидно, потребуются периодические подсыпки песка.

**Таблица 3.** Вдольбереговые потоки наносов, 10<sup>3</sup> м<sup>3</sup>/год

Румб	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
$\Theta_0$ , град.	90	45	0	-45	-90
$\sum Q_i t_{wi}$	3.94	20.45	0	-38.78	-6.77
$Q_{net}$	-21.2 (поток на ЮВ)				
$Q_{\Sigma}$	70.0				

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют рекомендовать следующий алгоритм расчета искусственного пляжа. Вначале задается желаемая ширина надводного пляжа  $l_{beach}$  (и соответственно выдвигание берега  $X$ ). С учетом имеющихся ресурсов выбирается средний размер строительного песка  $d_g$ , который должен быть не меньше крупности естественных наносов. По значению  $d_g$  оценивается параметр профиля равновесия  $A$ .

Затем на основе режимных характеристик волнения (примером служит табл. 1) определяются параметры расчетного шторма (например,  $H_{s012}$  и  $T_{s012}$ ). По ним рассчитываются глубина замыкания, уклон надводного пляжа и высота волнового заплеска. В итоге определяются форма и размеры искусственного профиля. Сравнение полученного профиля с натуральным позволяет оценить величины  $l_{beach}$  и  $X$ , а также объем материала, требуемый для строительства. Если полученная ширина пляжа  $l_{beach}$  удовлетворяют ожидаемому значению, то вычисления переходят на следующий шаг, на котором рассчитываются параметры строительной бермы. Если же  $l_{beach}$  заметно отклоняется от заданного значения, то следует изменить параметр  $X$ , сдвинув весь искусственный профиль на соответствующую величину  $\Delta X$ . Это влечет за собой изменение объема строительного



материала, и размеры бермы далее рассчитываются с учетом этих изменений. Наконец, если сдвиг профиля не приводит к желаемым результатам, то единственным решением остается выбор иной крупности строительного песка.

Потери пляжевых наносов, обусловленные вдольбереговым переносом, оцениваются на основе зависимости Дина (18). При этом коэффициент диффузии трактуется как функция суммарной емкости потоков наносов, определяемой по методике автора (формула (19)). Фоновые потери, обусловленные повышением относительного уровня моря, подсчитываются с помощью известного правила Брууна.

Описанный алгоритм применен к расчету искусственного пляжа для участка берега западного Крыма. При использовании песка размером 0.5 мм можно построить пляж шириной от 64 до 74 м при объемах отсыпки от 150 до 230 м<sup>3</sup>/м. Выполненное моделирование волновых воздействий показывает, что строительный профиль со временем приблизится к проектному профилю и будет устойчив по отношению к сильным штормам.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0128-2021-0004) при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-55-34002 Куба\_т).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю.Н. Изменения береговой зоны Евпатории за последние 100 лет // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 5–21. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-5-21>
2. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
3. Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с. ISBN: 978-3-659-62831-3.
4. Леонтьев И.О. О расчете вдольберегового транспорта наносов // Океанология. 2014. Т. 54. № 2. С. 226–232.
5. Леонтьев И.О. Искусственный пляж как средство защиты берегов от штормовых нагонов (на примере восточной части Финского залива) // Океанология. 2019. Т. 59. № 2. С. 292–301. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574592292-301>
6. Леонтьев И.О. Динамика берегового профиля с подводными валами в масштабе штормового цикла // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 805–813. <https://doi.org/10.31857/S0030157420050123>
7. Леонтьев И.О. К определению глубины замыкания у песчаного берега // Океанология. 2022. Т. 62. № 2. <https://doi.org/10.31857/S0030157422020101>
8. Романюк О.С., Луцик А.В., Морозов В.И. Условия формирования и динамика морского побережья в районе Сакской курортной зоны. Симферополь: ИМР, 1992. С. 12–21.
9. Российский морской регистр судоходства. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Под ред. Л.И. Лопатухина и др. СПб.: Гидрометеиздат, 2006. 452 с.
10. Свод правил “Проектирование морских берегозащитных сооружений” СП 32-103-97. НИЦ “Морские берега”. ОАО ЦНИИС. 1997. 141 с.
11. Bruun P. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages // J. of Coastal Res. 1988. V. 4. № 4. P. 627–648.
12. Dean R.G. Equilibrium beach profiles. Characteristics and applications // J. of Coastal Res. 1991. V. 7. № 1. P. 53–84.
13. Dean R.G. Beach nourishment: theory and practice. World Scientific Inc., 2002. 399 p.
14. Hallermeier R.J. Uses for a calculated limit depth to beach erosion // Proc. 16<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference. ASCE. New York. 1978. V. 2. P. 1493–1512.
15. Hernandez C.G. Actuaciones para el control de la erosión en playas biogénicas el caso de la playa de Varadero. La Habana: Instituto de Oceanología de Academia de Ciencias de Cuba. 2005. 55 p.
16. Pelnaud-Considère R. Essai de theorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. Quatr. J. hydraulique. Paris, 1956. Question 3. Rapp. № 1.
17. Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger A.H. Empirical parameterization of setup, swash, and runup // Coastal Engineering. 2006. V. 53. P. 573–588.
18. 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.
19. Verhagen H.T. Method for artificial beach nourishment // Proc. 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Coastal Engineering. ASCE. Venice, 1992. P. 2474–2485.

## Assessment of the Artificial Sandy Beach Parameters

I. O. Leont'yev<sup>#</sup>

Shirshov Institute of oceanology RAS, Moscow, Russia

<sup>#</sup>e-mail: igor.leontiev@gmail.com

Some decisions are proposed to the problems of designing the artificial sandy beach protecting the sea shore and providing its recreational capacity. Submerged part of the artificial profile is approximated by Dean's [13] equilibrium profile, while its subaerial segment is determined taking account the storm surge and runup

heights. Parameters of building berm are determined under condition that initially the whole structural material is concentrated on subaerial beach. Submerged profile is formed by the waves themselves, what is confirmed by the numerical modelling performed. When computed beach width differs from designed value it can be corrected by shifting the whole artificial profile on appropriate distance. However in case of too large distinction the only thing to do is to take another sediment size. Beach material losses depend on the longshore diffusion coefficient, which is determined by the author as the function of yearly sum of the longshore sediment fluxes. The graphs of sediment losses versus the wave activity, sediment fluxes and beach length are represented. Background losses due to sea-level rise are also taken into consideration. Suggested calculating algorithm is applied to design the artificial beach in the Western Crimea coastal segment. It is shown that designed beach profile would not change significantly under severe storm attack.

**Keywords:** artificial beach, beach width, equilibrium beach profile, building berm, beach material losses, longshore sediment fluxes