

УДК 551.435.3

## ИСКУССТВЕННЫЙ ПЛЯЖ КАК СРЕДСТВО ЗАЩИТЫ БЕРЕГОВ ОТ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ (ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ ФИНСКОГО ЗАЛИВА)

© 2019 г. И. О. Леонтьев

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

Поступила в редакцию 20.01.2016 г.

Принята к публикации 08.02.2018 г.

Предложена модель искусственного пляжа для защиты берегов, испытывающих размыв под действием значительных штормовых нагонов. Свойства профиля пляжа трактуются на основе концепции профиля равновесия Дина. Показано, что использование более крупного песка ведет к увеличению общей ширины пляжа, но требует большего объема материала. Вместе с тем при увеличении крупности песка и протяженности пляжа уменьшаются относительные потери материала, обусловленные вдольбереговым переносом. Применение модели к трем участкам размывающихся берегов Курортного района Санкт-Петербурга (восточная часть Финского залива) позволяет рекомендовать для строительства пляжей среднезернистый песок 0.3–0.5 мм. Ширина надводной части пляжа в этом случае должна составить 80–140 м, а объемы отсыпки –  $(1.3 \div 3.2) \times 10^2 \text{ м}^3$  на метр длины берега в зависимости от величины дефицита наносов на данном участке. Для уменьшения относительных потерь материала целесообразно строить пляж протяженностью не менее 1 км, что позволит сохранить более половины его первоначального объема даже через 30 лет. Моделирование воздействий экстремального шторма показывает, что проектные профили пляжа испытывают лишь небольшие деформации и способны сохранять свой ресурс в течение многих лет.

**Ключевые слова:** искусственный пляж, штормовой нагон, размыв пляжа, защита берега, транспорт наносов

DOI: 10.31857/S0030-1574592292–301

### ВВЕДЕНИЕ

Применение искусственных пляжей в качестве сооружений, противодействующих штормовому воздействию на берега, давно доказало свою эффективность и находит все более широкое распространение в практике берегозащиты [11, 13]. Определение параметров подобных сооружений в России регламентируется Сводом правил «Проектирование морских берегозащитных сооружений» СП 32-103-97, который разработан НИЦ «Морские берега» (ОАО ЦНИИС) и «...распространяется на проектирование морских берегозащитных сооружений на побережьях бесприливных морей, крупных озер и водохранилищ, кроме морей Северного Ледовитого океана» [10]. Подразумеваются побережья, где колебания уровня, связанные с приливами и нагонами, не играют определяющей роли, что достаточно типично для многих внутренних бассейнов.

Вместе с тем существует немало берегов, не подпадающих под эту категорию, динамика которых связана с экстремально высокими штормовыми нагонами. Таковы, например, берега Ку-

рортного района Санкт-Петербурга (восточная часть Финского залива, рис. 1). Вследствие значительных нагонов даже сравнительно невысокие штормовые волны размывают верхнюю часть авантюны, а затем умеренные и слабые волнения перемещают наносы на подводный склон, что в итоге ведет к безвозвратным потерям материала надводной части берега [6, 7]. В результате пляжи истощаются, берега отступают и их рекреационный потенциал не используется в полной мере.

Существующее положение можно было бы исправить путем создания искусственных песчаных пляжей на уязвимых участках берега. Однако предсказание параметров устойчивого пляжа в условиях, когда высота нагона превышает высоту волн, едва ли может быть осуществлено на базе традиционных методик. В настоящей работе предложен альтернативный подход к прогнозу песчаного пляжа, который, в общем, следует логике [10], но отличается в трактовке показателей обрушения и заплеска волн, а также параметров профиля равновесия в условиях аномально высокого штормового уровня моря. Разработанная модель устойчивого пляжа при-



Рис. 1. Побережье восточной части Финского залива и расположение расчетных профилей.

менена к трем участкам побережья Курортного района Санкт-Петербурга (рис. 1). Оценены требуемые объемы строительного материала, а также его потенциальные потери, обусловленные вдольбереговым перемещением наносов. Эффективность рассчитанных пляжей как берегозащитных сооружений проверена с помощью математического моделирования экстремального штормового воздействия на берег.

### МОДЕЛЬ УСТОЙЧИВОГО ПЛЯЖА

**Геометрия профиля.** Схема профилей фактического и проектного пляжей отражена на рис. 2. Возвышение  $z$  измеряется от среднего штилевого уровня, а горизонтальное расстояние  $x$  отсчитывается в сторону моря от максимального возвышения пляжа, соответствующего сумме высот штормового нагона  $\eta$  и волнового заплеска  $R$ . Полная протяженность проектного профиля  $l_{prof}$  определяется суммой

$$l_{prof} = l_a + l_R + l_* \quad (1)$$

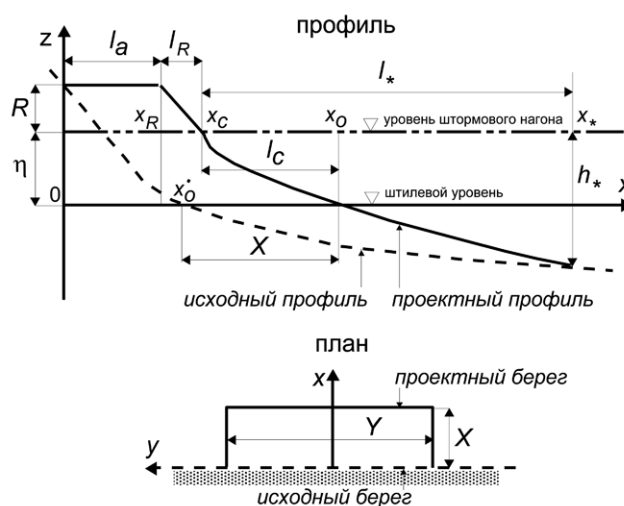


Рис. 2. Схема искусственного пляжа. Основные обозначения:  $l_a$  — ширина строительной бермы,  $l_R$  — ширина зоны волнового заплеска,  $l_*$  — протяженность подводной части профиля,  $X$  — расстояние, на которое выдвигается береговая линия,  $Y$  — протяженность пляжа вдоль берега,  $\eta$  и  $R$  — высоты штормового нагона и волнового заплеска,  $h_*$  — глубина замыкания.

Горизонтальный участок  $l_a$  соответствует ширине бермы, содержащей необходимый запас материала. Регулируя величину  $l_a$ , можно перемещать весь профиль в сторону моря или суши, добываясь его пересечения с фактическим профилем на глубине замыкания  $h_*$ , которая ограничивает область значимых деформаций дна (рис. 2).

Ширина зоны волнового заплеска  $l_R$  зависит от его высоты  $R$  и уклона дна  $\beta_R$ :

$$l_R = R / \beta_R. \quad (2)$$

Участок  $l_*$ , характеризующий подводную часть склона при штормовом уровне, определяется профилем равновесия Дина [12, 13, 16]:

$$h = Ax^{2/3}, \quad A = 2.25(w_g^2/g)^{1/3}, \quad (3)$$

где  $h$  — глубина воды при штормовом уровне (рис. 2),  $w_g$  — скорость осаждения твердых частиц в воде (гидравлическая крупность), возрастающая с их размером,  $g$  — ускорение силы тяжести, а параметр  $A$  имеет порядок  $10^{-1} \text{ м}^{1/3}$  и увеличивается с ростом крупности наносов. Соответственно, протяженность участка  $l_*$  составляет

$$l_* = (h_* / A)^{3/2}. \quad (4)$$

Ширина надводной части пляжа равна

$$l_{beach} = l_a + l_R + l_c, \quad l_c = (\eta / A)^{3/2}, \quad (5)$$

где  $l_c$  — горизонтальное расстояние между отметками штормового и штилевого уровней ( $x_0$  и  $x_c$ , рис. 2).

Выдвижение берега  $X$  в пределах искусственного пляжа определяется расстоянием между точками штилевого уреза проектного и исходного профилей:  $X = x_0 - x'_0$  (рис. 2).

Что касается возвышений проектного профиля, то они выражаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} z &= \eta + R, \quad 0 \leq x \leq x_R, \\ z &= \eta + R - (x - x_R)\beta_R, \quad x_R \leq x \leq x_c, \\ z &= \eta - A(x - x_0)^{2/3}, \quad x_c \leq x \leq x_*, \end{aligned} \quad (6)$$

где положение точек  $x_R$ ,  $x_c$  и  $x_*$  поясняется на рис. 2.

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

$$V = \int_0^{x_*} (z - z') dx, \quad (7)$$

где  $z'$  — возвышение фактического профиля относительно штилевого уровня.

**Расчетные зависимости.** Проектируемый пляж рассчитывается на экстремальный шторм, ха-

рактеризуемый высотой волн в открытом море  $H_\infty$ , периодом  $T$  и максимальным уровнем штормового нагона  $\eta$ . Показателями  $H_\infty$  и  $T$  служат средние значения  $\bar{H}_\infty$  и  $\bar{T}$ , либо значительная высота  $H_{s\infty}$  и период спектрального пика  $T_p$ , связанные соотношениями

$$H_{s\infty} = 1.6\bar{H}_\infty, \quad T_p = 1.2\bar{T}, \quad (8)$$

которые следуют из рэлеевского распределения высот и эмпирических результатов [4].

Высота волнового заплеска оценивается по известной формуле Ханта [2, 14]:

$$R = \beta_R \sqrt{H_{s\infty} L_\infty}, \quad (9)$$

где  $L_\infty = (g/2\pi)T_p^2$  — длина волн на глубокой воде. Из соотношений (9) и (2) следует, что ширина зоны заплеска зависит только от параметров волн:

$$l_R = \sqrt{H_{s\infty} L_\infty}. \quad (10)$$

Равновесный уклон дна в зоне заплеска  $\beta_R$  определяется на основе зависимости Сунамуры [17], используемой и в [10]:

$$\beta_R = 0.12 \left( \frac{T_p \sqrt{gd_g}}{H_{sB}} \right)^{0.5}, \quad (11)$$

где  $d_g$  — средний размер частиц песка,  $H_{sB}$  — значительная высота волн на глубине обрушения  $h_B$ . Последняя трактуется как глубина обрушения волн 1% обеспеченности в системе, и при нормальном подходе волн к берегу определяется зависимостью [4]:

$$h_B = \left( \frac{1}{4\pi\gamma_B^2} \right)^{2/5} H_{1\%B}^{4/5} (gT_p^2)^{1/5}, \quad (12)$$

где  $\gamma_B = H_{1\%B} / h_B = 0.8$  — индекс обрушения. В случае рэлеевского распределения высот волн имеем  $H_{1\%B} = 1.52H_{s\infty}$ . Допуская, что последнее соотношение сохраняется и на глубине  $h_B$ , т.е.  $H_{1\%B} = 1.52H_{sB}$ , имеем  $H_{sB} = 0.53h_B$ .

Далее предполагаем, что глубина замыкания  $h_*$  соответствует глубине  $h_B$ :

$$h_* = h_B. \quad (13)$$

Гидравлическая крупность наносов  $w_g$ , определяющая параметр  $A$  в уравнении профиля (3), рассчитывается на основе зависимостей [15], учитывающих типичную форму натуральных частиц песка:

$$\begin{aligned} \frac{w_g}{\sqrt{(s-1)gd_N}} &= \left( 0.954 + \frac{5.12}{S_*} \right)^{-1}, \\ S_* &= \frac{d_N}{4\nu} \sqrt{(s-1)gd_N}, \quad d_N \leq 3 \text{ мм}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $s = \rho_g / \rho$ ,  $\rho_g$  и  $\rho$  — плотности твердых частиц и воды,  $\nu$  — вязкость воды, зависящая от температуры ( $10^{-6}$  и  $1.3 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при 20 и 10°C соответственно),  $d_N$  — номинальный диаметр сферы с объемом, эквивалентным объему натуральной частицы, средний размер которой ( $d_g$ ) определен на основе ситового анализа проб, причем  $d_N = d_g / 0.9$ .

### ИСКУССТВЕННЫЕ ПЛЯЖИ ДЛЯ БЕРЕГОВ КУОРТНОГО РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

**Основные предпосылки.** Изложенная модель применена для расчета искусственных пляжей, способных обеспечить защиту побережья Курортного района Санкт-Петербурга в пределах участков Комарово, Репино и Солнечное (рис. 1), где распространены абразионно-аккумулятивные берега с относительно узкими песчаными пляжами и комплексом невысоких дюн. Песчаный слой лежит на поверхности грубообломочных консолидированных отложений (в частности, валунов), нередко обнажающихся в ложбинах рельефа. Современная динамика указанных берегов характеризуется размывом и отступанием авантюны со скоростью 0.3–0.5 м/год [6, 7].

Типичные профили берега и характер донных осадков отражены на рис. 3. Основной служат данные мониторинга береговой зоны, который в течение ряда лет осуществляется ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского в Санкт-Петербурге [9]. Результаты мониторинга показывают, что особенно заметный ущерб берегам наносят шторма, действующие на фоне нагона высотой около 2 м. В прошлом веке подобные шторма случались примерно 1 раз в 25 лет [1], но в последние десятилетия их частота возросла по меньшей мере вдвое [7]. Показатели пика экстремального события характеризуются величинами [6]:

$$\bar{H}_\infty = 1.0 \text{ м}, \bar{T} = 4.5 \text{ с}, \eta = 2.0 \text{ м}.$$

Глубина замыкания, согласно (12) и (13), составляет  $h_* = 2.7$  м. Следовательно, основание профиля должно располагаться на глубине относительно штилевого уровня  $h_* - \eta = 0.7$  м. Ширина зоны заплеска в соответствии с (10) равна  $l_R = 8.5$  м.

На основе приведенных величин были выполнены расчеты искусственных пляжей, включающие 4 варианта крупности строительного песка: 0.3, 0.5, 0.7 и 1.0 мм. Первый из них соответствует наиболее типичному размеру частиц пляжевого материала в исследуемом районе.

**Результаты расчетов.** Полученные параметры профилей пляжа для различной крупности песка отражены в табл. 1, а сами профили показаны на рис. 3. Высота заплеска  $R$ , по расчетам, колеблется от 0.5 до 0.6 м, а максимальное возвышение профилей  $\eta + R$ , как видно из табл. 1, составляет от 2.5 до 2.6 м.

С ростом крупности песка ширина строительной бермы  $l_a$ , общая ширина пляжа  $l_{beach}$  и выдвигание берега  $X$  увеличиваются. Объем пляжа  $V$ , в наибольшей мере зависящий от  $l_a$ , так же возрастает с увеличением крупности материала.

Таким образом, применение более крупного песка обеспечивает более широкий пляж, но требует большего объема отсыпки и удорожает проект. Для участков Комарово и Репино самым экономным кажется вариант с использованием песка 0.3 мм, который обеспечивает достаточную ширину пляжа при сравнительно меньшем количестве материала. Для пляжа Солнечного этот вариант не предусматривает запаса материала бермы ( $l_a = 0$ ). Поэтому, несмотря на увеличение объема затрат, здесь лучше использовать более крупный песок, скажем, 0.5 мм.

### ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ ПЛЯЖЕЙ

Проверка защитных свойств пляжей и их устойчивости осуществлялась с помощью математического моделирования штормовых воздействий на берег при использовании модели

**Таблица 1.** Расчетные параметры профилей искусственных пляжей при различной крупности песка

$d_g$ , мм	$\eta + R$ , м	Комарово			Репино			Солнечное		
		$X$ , м	$l_{beach}$ , м	$V$ , м <sup>3</sup> /м	$X$ , м	$l_{beach}$ , м	$V$ , м <sup>3</sup> /м	$X$ , м	$l_{beach}$ , м	$V$ , м <sup>3</sup> /м
0.3	2.46	93	113	210	85	124	175	40	82	31
0.5	2.53	110	132	322	101	144	289	56	101	131
0.7	2.57	119	138	364	108	151	332	63	108	171
1.0	2.62	125	144	398	112	156	363	68	114	202

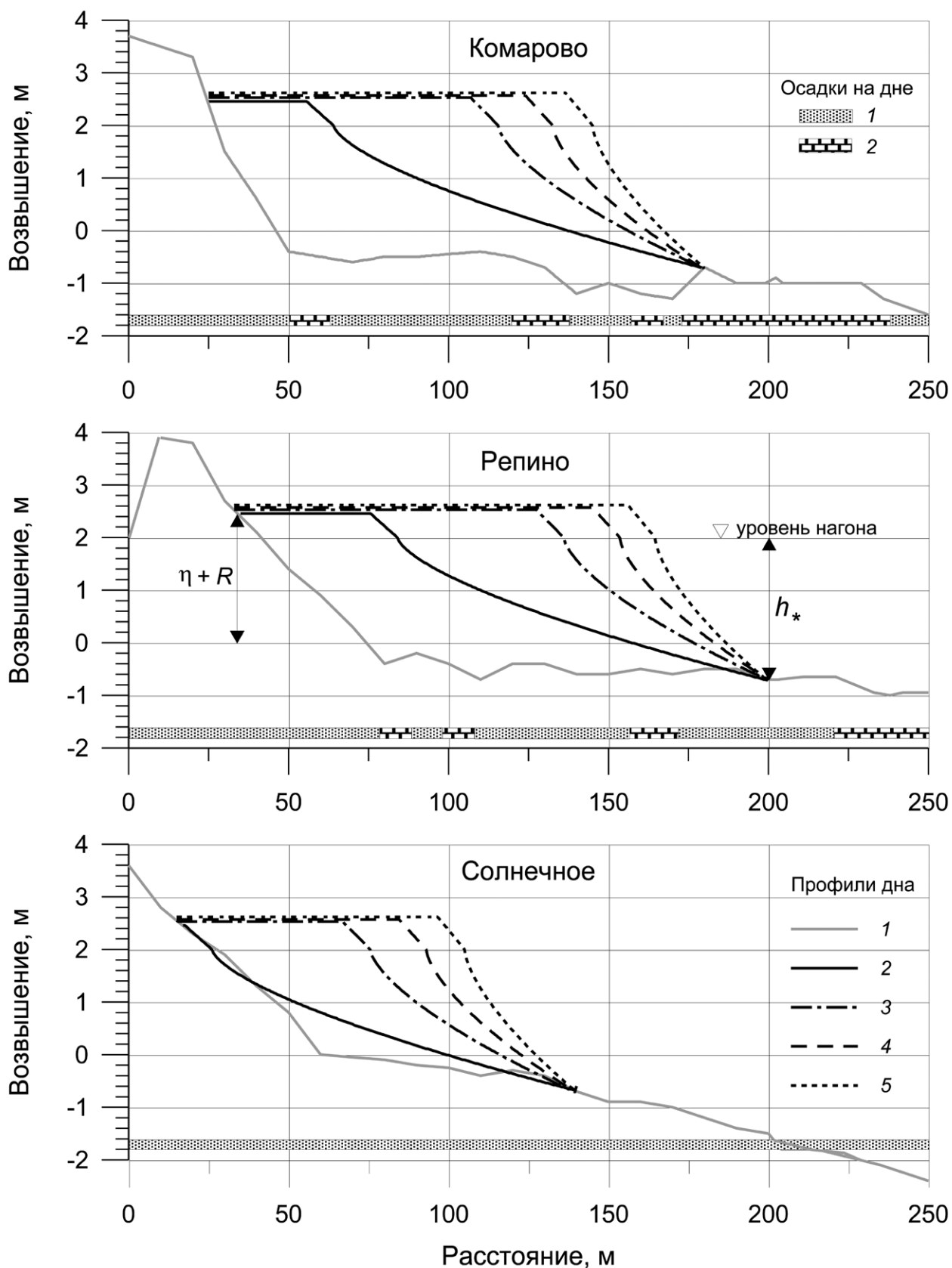


Рис. 3. Исходные профили дна, характер донных осадков и проектные профили пляжей для трех участков побережья Курортного района. Осадки на дне: 1 — песок, 2 — валуны. Профили дна: 1 — исходный, 2, 3, 4 и 5 — искусственные профили, построенные из песка крупностью 0.3, 0.5, 0.7 и 1.0 мм соответственно.



CROSS-P, которая хорошо себя зарекомендовала в условиях рассматриваемых берегов [4, 6].

Выше были приведены параметры пика экстремального шторма, использованного при расчетах пляжей. Типичный сценарий подобного шторма характеризуется в табл. 2 [6], где волновые параметры выражены в терминах средней высоты  $\bar{H}_\infty$  и среднего периода  $\bar{T}$ . В стадии развития происходит рост уровня и параметров волн, а после прохождения пика показатели шторма снижаются. Его продолжительность составляет около 1 суток. Углы подхода волн относительно нормали к берегу приняты как  $45^\circ$  для Комарово и Репино и  $15^\circ$  для Солнечного.

В качестве исходных профилей при моделировании были взяты профили пляжей, построенных из песка 0.3 и 0.5 мм. Полученные результаты показаны на рис. 4.

Как видно, прохождение шторма вызывает лишь сравнительно небольшие изменения морфологии профиля. Деформации во всех случаях однотипны, а их небольшие различия связаны с различием батиметрии внешних частей профилей. Максимальные деформации дна не превышают 0.5 м. Слабый размыв верхней части пляжей и небольшое перемещение наносов вниз по склону не приводит к существенным потерям материала. Отметим для сравнения, что воздействие того же шторма на естественный (незащищенный) берег может вызвать отступление переднего склона авандюны на несколько метров [6, 9]. По-видимому, проектные профили способны выдержать не одну экстремальную штормовую атаку, и срок их жизни явно больше периода повторяемости экстремальных воздействий (порядка 10 лет).

Заметим также, что полученные результаты подтверждают правильность выбора глубины замыкания как  $h_* = h_B$ , так как глубже деформации дна практически не заметны.

## ПОТЕРИ ПЛЯЖЕВОГО МАТЕРИАЛА

Искусственный пляж выглядит в плане как возмущение береговой линии в форме прямо-

угольника с поперечным размером  $X$  и длиной вдоль берега  $Y$  (рис. 2). Под действием вдольберегового транспорта наносов, вызываемого волнами, материал пляжа должен выноситься за его пределы, объем пляжа будет со временем уменьшаться, а плановые очертания берега — изменяться. Эти процессы, как показано Динном [13], можно описать с помощью закона сохранения массы, который при определенных условиях принимает форму уравнения диффузии:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = G \frac{\partial^2 x_0}{\partial y^2}, \quad G = \frac{Q}{(h_* + R)}, \quad (15)$$

где  $x_0$  — положение береговой линии,  $t$  — время,  $y$  — расстояние вдоль берега, параметр  $G$  имеет смысл коэффициента диффузии ( $\text{м}^2/\text{год}$ ).

Величина  $Q$  характеризует масштаб действующего потока наносов  $Q$ , который представлен в форме  $Q = Q \sin \alpha \cos \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлением волн и нормалью к берегу. Максимум функции  $(\sin \alpha \cos \alpha)_{\max} = 1/2$ , а значит  $Q = 2Q_{\max}$ . Иначе говоря,  $Q$  представляет удвоенную максимальную емкость потока наносов  $Q_{\max}$  вдоль данного берега ( $\text{м}^3/\text{год}$ ).

Решение уравнения (15), полученное Динном для рассматриваемого случая, представлено графически на рис. 5. Показаны изменения контура берега в зависимости от безразмерного показателя времени  $\bar{t} = \sqrt{Gt} / Y$ . Предполагается, что вдольбереговые потоки наносов симметричны. Как видно, тело пляжа постепенно расплывается вследствие перемещения материала в обе стороны вдоль берега. При доминировании потоков того или иного направления картина, очевидно, была бы несимметричной [8].

Согласно результатам Дина, объем материала  $V(t)$ , остающийся в пределах исходного контура пляжа, по отношению к первоначальному объему  $V_0$  можно оценить по приближенной зависимости

$$\frac{V(t)}{V_0} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{Gt}}{Y}. \quad (16)$$

**Таблица 2.** Сценарий экстремального шторма, использованный при расчетах

Фазы шторма, ч	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
Ветер, м/с	10	15	18	20	16	13	10	5
Уровень моря, м	0.5	1.0	1.5	2.0	1.6	1.3	1.0	0.3
Высота волн, м	0.4	0.7	0.9	1.0	0.9	0.7	0.5	0.3
Период волн, м	3.0	3.5	4.0	4.5	4.5	4.0	3.7	3.5

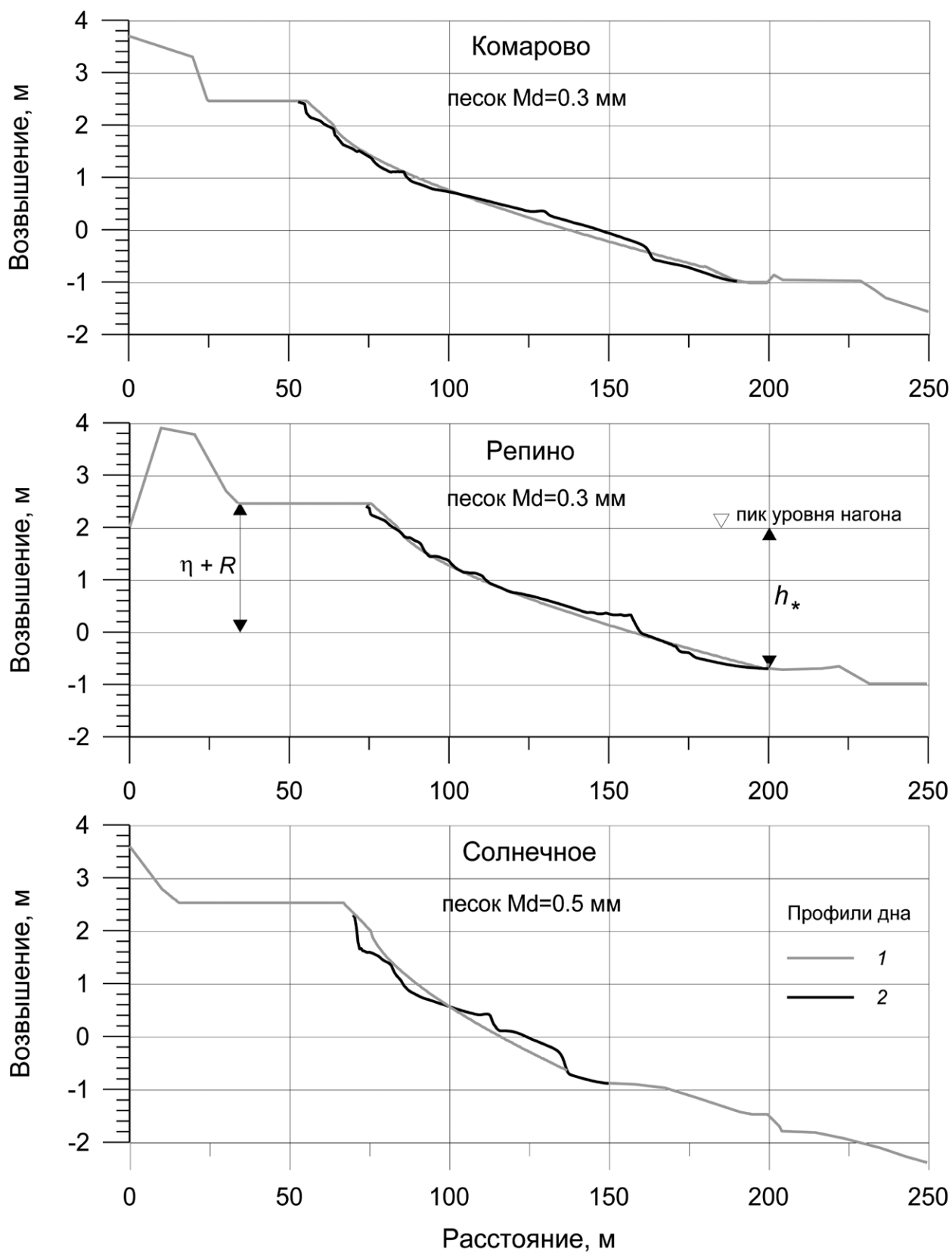


Рис. 4. Расчетные штормовые деформации берегов с искусственными пляжами: 1 — начальный профиль дна, 2 — профиль после экстремального шторма (его сценарий отражен в табл. 2).

Для определения коэффициента  $G$  следует оценить потенциальные потоки наносов на участках искусственных пляжей в рассматриваемом регионе Финского залива. Расчеты были выполнены на основе методики [4, 5] при использовании волновых данных [3]. Полученные оценки потоков песка крупностью 0.3, 0.5 и 1.0 мм приведены в табл. 3.

Потоки асимметричны, доминирует перенос в восточном направлении. Для размеров частиц 0.3 и 1.0 мм суммы абсолютных величин потоков различаются примерно вдвое. В качестве масштаба максимальной емкости потока  $Q_{\max}$  для среднего песка, по-видимому, можно принять значение  $10 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$ , а для крупного песка —  $5 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$ . Тогда с учетом величины  $h_* + R \approx 3.2 \text{ м}$  соответствующие коэффициенты диффузии определяются как  $G_{0.3} \approx 6 \times 10^3 \text{ м}^2/\text{год}$  и  $G_{1.0} \approx 3 \times 10^3 \text{ м}^2/\text{год}$ .

На рис. 6 показаны графики зависимости (16) для среднего и крупного песка и для трех вариантов длины пляжа. Как видно, чем длиннее пляж и крупнее песок, тем меньше относительные потери материала. В случае крупного песка при длине пляжа 250 м его объем уменьшается наполовину уже через 4 года, при длине 500 м это происходит через 16 лет, а при длине 1000 м даже через 50 лет сохраняется больше половины первоначального объема. В случае среднего песка потери материала несколько возрастают, и пляж километровой длины уменьшается в объеме наполовину через 32 года. Это, однако, также можно считать вполне приемлемым показателем, поскольку для поддержания пляжа достаточно небольших периодических подсыпок песка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель искусственного пляжа учитывает специфику берегов, развивающихся в условиях значительных штормовых

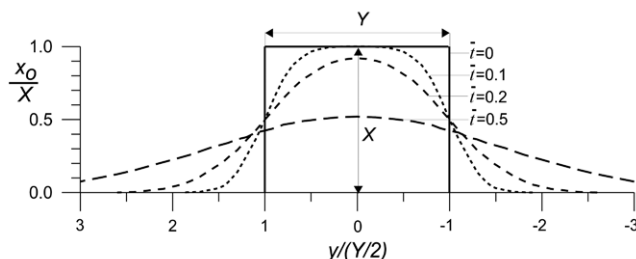


Рис. 5. Эволюция контура берега искусственного пляжа в условиях симметричных вдольбереговых потоков наносов. Время определяется безразмерным показателем  $\bar{t} = \sqrt{Gt} / Y$ .

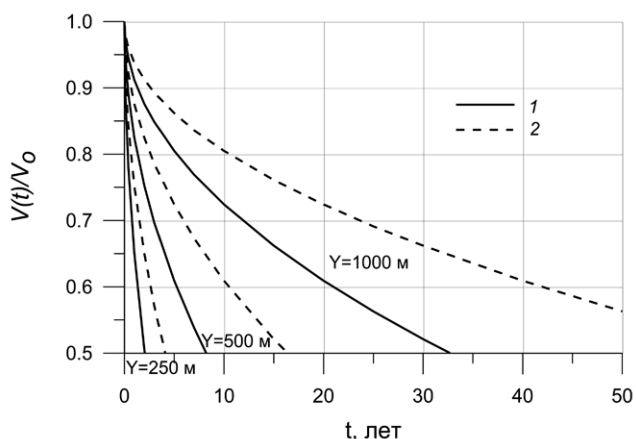


Рис. 6. Уменьшение объема искусственного пляжа с течением времени при различных вариантах его длины ( $Y$ ) и размера частиц песка: 1 — среднезернистый песок 0.3 мм, 2 — крупнозернистый песок 1.0 мм.

нагонов. Верхняя отметка профиля пляжа отвечает пику нагона и волнового заплеска при экстремальном шторме редкой повторяемости (порядка 10 лет), а нижняя граница соответствует глубине обрушения волн при максимальном уровне воды. Свойства профиля трактуются на основе концепции профиля равновесия Дина [12, 16] с учетом эмпирических результатов Сунамуры [17].

Таблица 3. Потенциальные вдольбереговые потоки наносов (тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$ ) на участках искусственных пляжей

Район	$d_g$ , мм	Поток на Восток	Поток на Запад
Комарово–Репино	0.3	9.3	2.0
	0.5	6.1	1.4
	1.0	4.4	1.0
Солнечное	0.3	5.8	4.0
	0.5	3.9	2.7
	1.0	2.8	2.0



Увеличение крупности строительного песка ведет к увеличению ширины строительной бермы и росту объема отсыпки. Удлинение пляжа также удорожает проект. Однако эти тенденции должны рассматриваться в контексте возможных потерь материала, обусловленных его вдольбереговым переносом за пределы пляжа.

Изложенный в статье метод применен к трем участкам размывающихся берегов Курортного района Санкт-Петербурга, где для строительства пляжей рекомендуется использовать среднезернистый песок размером 0.3–0.5 мм. Ширина надводной части пляжа составит 80–140 м, а объемы отсыпки будут измеряться величинами порядка  $(1.3–3.2) \times 10^2 \text{ м}^3$  на метр длины берега в зависимости от величины дефицита наносов на данном участке. Выдвижение берега в сегменте Комарово–Репино составит 90–100 м, а в районе Солнечное — около 60 м.

Объемы потерь в данной работе оцениваются с помощью подхода Дина [13], основанного на решении уравнения эволюции береговой линии. Одним из ключевых параметров здесь является коэффициент диффузии  $G$ , зависящий от максимальной емкости вдольберегового потока наносов. Значение  $G$  для крупного песка (1.0 мм) оказывается примерно вдвое меньше, чем для среднего (0.3 мм), что означает уменьшение относительных потерь с ростом крупности материала. Увеличение протяженности пляжа также ведет к уменьшению потерь. Согласно проведенным расчетам, при длине пляжа не менее 1 км даже через 30–50 лет (в зависимости от крупности песка) может сохраниться более половины его первоначального объема (без дополнительной подпитки).

Устойчивость проектных пляжей проверена с помощью моделирования воздействий экстремального шторма. Обнаружено, что береговые профили испытывают лишь небольшие деформации и способны сохранять свой ресурс в течение достаточно длительного времени, превышающего период повторяемости экстремальных событий.

В заключение отметим, что в условиях очень пологих береговых склонов основание расчетного профиля может оказаться на слишком большом удалении от берега, что неприемлемо по экономическим соображениям. В этих случаях рекомендуется ограничить расстояние  $X$ , на которое будет выдвинута береговая линия,

что позволит сократить ширину строительной бермы и снизить расход материала. Как показывает опыт расчетов, некоторое уменьшение глубины у основания профиля, связанное с ограничением величины  $X$ , не оказывает заметного влияния на его устойчивость, если используется достаточно крупный песок или гравий.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-05-08239, № 16-55-76002 ЭРА\_а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барков Л.К. Литодинамические процессы в прибрежной зоне восточной части Финского залива от м. Лаутаранта до м. Дубовский // Изв. ВГО. 1991. Т. 123. Вып. 1. С. 60–67.
2. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
3. Леонтьев И.О. Оценка поперечного потока наносов на границе прибрежной зоны // Океанология. 2008. Т. 48. № 1. С. 132–138.
4. Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с. ISBN: 978-3-659-62831-3.
5. Леонтьев И.О. О расчете вдольберегового транспорта наносов // Океанология. 2014. Т. 54. № 2. С. 226–232.
6. 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.
7. Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Ковалева О.А. Прогноз рецессии берегов восточной части Финского залива на ближайшее столетие // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 480–487.
8. Рыбак О.Л. Подводные и береговые морфоструктуры // Человечество и береговая зона мирового океана в XXI веке. М.: ГЕОС, 2001. С. 301–313.
9. Рябчук Д.В., Колесов А.М., Сергеев А.Ю. и др. Абразионные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами режимообразующих факторов // Геоморфология. 2012. № 4. С. 99–105.
10. Свод правил «Проектирование морских берегозащитных сооружений» СП 32-103-97. НИЦ «Морские берега». ОАО ЦНИИС. 1997. 141 с.
11. Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В. и др. Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 239 с.
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. *Hunt I.A.* Design of seawalls and breakwaters // *J. of Waterway and Harbors Div.* 1959. V. 85. P. 123–152.
15. *Jimenez J.A., Madsen O.S.* A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments // *Journ. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.* ASCE. 2003. V. 129. № 2. P. 70–78.
16. *Kriebel D.L., Kraus N.C., Larson M.* Engineering methods for predicting beach profile response // *Int. Conf. "Coastal Sediments'91"*. Seattle. 1991. P. 557–571.
17. *Sunamura T.* Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling // *Applications in coastal modeling/* Eds. *Lakhan V.C., Trenhail A.S.* Elsevier, Amsterdam, 1989. P. 159–213.

## ARTIFICIAL BEACH AS A STRUCTURE TO DEFEND A SEA COAST FROM THE STORM SURGE IMPACT (BASED ON THE EXAMPLE OF THE EASTERN GULF OF FINLAND)

© 2019 I. O. Leont'yev

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

Received January 20, 2016  
After revision February 08, 2018

The model of artificial beach to protect a sea coast subjected to erosion under impact of significant storm surge is suggested. The beach profile properties are based on the concept of equilibrium profile by Dean. It is shown that the use of coarser sand provides greater total width of beach, but requires greater volume of constructional berm. At the same time, the loss of material due to longshore sediment transport decreases. Application of the model to three segments of eroded coast in Kurortnyy region of St. Petersburg (Eastern Gulf of Finland) allows recommend the medium sand 0.3–0.5 mm to construct the artificial beach. In this case, the width of dry beach section would be about 80–140 m, while the volume of constructional berm would be  $(1.3 \div 3.2) \times 10^2 \text{ m}^3/\text{m}$  depending on sediment deficit in a given coastal segment. In order to minimize the relative loss of material it is suggested to construct the beach of which the length is not less than 1 km. In this case, more than half of initial beach volume would be kept even after 30 years. Modeling of extreme storm impact leads to conclusion that the designed beach profiles are only slightly deformed and able conserve their resource over a long time.

**Keywords:** artificial beach, storm surge, beach erosion, shore protection, sediment transport