

УДК 627.52

© И. Г. Кантаржи^{1*}, И. О. Леонтьев², А. В. Куприн¹, 2023

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36.

*kantardgi@yandex.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ «КАРМАННОГО ПЛЯЖА»

Статья поступила в редакцию 22.02.2023, после доработки 01.06.2023, принята в печать 24.07.2023

Аннотация

Исследуется динамика пляжа, расположенного между естественными или искусственными поперечными преградами. Рассматривается пляж, расположенный в северо-восточной части Невской губы Финского залива. В западной части пляжа располагается валунная дамба, которая, однако, не обеспечивает защиту пляжа от размыва, вызванного вдольбереговым переносом наносов. Для обеспечения устойчивости пляжа в рамках проекта «База водных видов спорта в Приморском районе» планируется построить поперечные пляжеудерживающие сооружения. Целью данной работы является прогнозирование динамики береговых процессов рассматриваемого пляжа в новых условиях на срок ближайших двадцати лет. Рассчитан баланс наносов, который для рассматриваемого карманного пляжа состоит из трёх составляющих: объём эрозии, объём аккумуляции и объём байпассинга. По результатам расчетов выяснено, что в новых условиях вдольбереговой поток наносов со временем заметно уменьшается, что обусловлено разворотом контура берега и уменьшением угла волновой равнодействующей относительно береговой нормали. Было получено, что процессы размыва и аккумуляции в новых условиях со временем замедляются. Выдвижение берега в первые годы после строительства демонстрирует высокую скорость, замедляясь со временем. Отступление берега происходит более равномерно, также со временем замедляясь. Строительство рассматриваемых пляжеудерживающих сооружений позволяет замедлить процессы размыва береговой части «Парка 300-летия Санкт-Петербурга», однако данных мер недостаточно для полной остановки процесса размыва.

Ключевые слова: карманный пляж, вдольбереговой перенос наносов, эволюция берега, аккумуляция, байпассинг, берегозащита

© I. G. Kantarzhii^{1*}, I. O. Leont'ev², A. V. Kuprin¹, 2023

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MSUCE), 26 Yaroslavl highway, Moscow, 129337, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia

*kantardgi@yandex.ru

ANALYTICAL STUDIES OF THE DYNAMICS OF POCKET BEACH

Received 22.02.2023, Revised 01.06.2023, Accepted 24.07.2023

Abstract

The beach site is located in the utmost northeastern part of the Nevskaya Bay. A boulder dam is built on the western side, which, however, fails to protect the beach from the effects of waves that cause longshore sediment transport. The planned construction of transverse beach-retaining structures outlines in the "Water Sports Base in Primorsky District" initiative, might change the current situation. This study objective is to predict the evolution of the coastal contour resulting from the planned construction in the next few decades. A natural analogue of such an artificial structure could be a pocket beach located between two natural promontories. The sediment equilibrium at this study location includes three main components: volumes of erosion, accumulation and bypassing. The results include the computed wave patterns and the movement of sediment along the shoreline. The lateral sediment transport diminishes notably over time, driven by the alteration of the shoreline contour and the reduction in the angle between the wave equilibrium and the coastal resultant. The erosion and accumulation volumes increase over time, but their rates slow down. The shoreline displacement becomes more prominent over time; however, the rates of erosion differ from

accumulation. The shoreline is moving particularly fast in the first years after construction, and then the process slows down gradually. The introduction of artificial beach protection structures in the 300th Anniversary Park of St. Petersburg will considerably reduce both the pace of beach erosion and the affected area. However, the erosion process will not be completely halted.

Keywords: pocket beach, longshore sediment transport, shore evolution, accumulation, bypassing, shore protection

1. Введение

Карманный пляж, который рассматривается в нашей работе, располагается в крайнем северо-восточном районе Невской губы. С западной стороны построена валунная дамба (по сути, буна). Однако это обеспечивает защиту пляжа от воздействий волн, вызывающих вдольбереговой транспорт наносов (рис. 1) [1]. Так как с восточной стороны пляж не ограничен, материал выносится за его пределы, и берег довольно быстро отступает. Расстояние между штилевым урезом и подпорной стенкой набережной, опоясывающей пляж, значительно уменьшилось в последние годы, что создает угрозу разрушений при штормовых нагонах.

Планируемое строительство поперечных пляжеудерживающих сооружений, предусмотренных проектом «База водных видов спорта в Приморском районе» (далее — бун), может изменить существующее положение. Наиболее важная роль в этом будет принадлежать буне № 3, которая ограничит пляж с восточной стороны и воспрепятствует выносу материала (рис. 1). Изменение баланса наносов, очевидно, вызовет существенную морфологическую перестройку берега. Цель данной работы заключается в прогнозировании эволюции контура берега в новых условиях на период ближайших десятилетий.



Рис. 1. Современный снимок пляжа. Зеленая линия показывает урез воды в 2009 г.

Fig. 1. Modern image of the beach. The green line shows the water's edge in 2009

При подготовке были проанализированы предыдущие работы по данной теме. В этой работе не ставилась задача подробного анализа влияния поперечных сооружений на динамику прилегающего пляжа, на эту тему опубликованы многие работы, в том числе обзор в книге Леонтьева И.О. [2]. Работы Hanson H. [3, 4] содержат материалы по теме взаимного воздействия между волной, сооружением и донными осадками. Сведения о защите берега от волн с применением численного моделирования содержатся в работе Кантаржи И.Г. и др. [5]. В статьях [6, 7] рассматривается модель для прогнозирования изменений берега под влиянием наиболее распространенных типов сооружений в прибрежной зоне — бун, волноломов и портовых молов. Также учитывается работа [8], где для оценки влияния проектируемых берегозащитных сооружений на изменение прибрежных процессов используется подход с совместным применением методов моделирования и мониторинга.

2. Материалы и методы

Природным аналогом такого рассматриваемого искусственного объекта может служить так называемый карманный пляж, расположенный между двумя коренными мысами или искусственными поперечными барьерами (рис. 2).



Рис. 2. Пляж Клеопатры, Турция, Эгейское море

Fig. 2. Cleopatra's Beach, Turkey, Aegean Sea

Карманные пляжи — это небольшие пляжи, которые образуются между мысами и в бухтах вдоль скалистых береговых линий. Они могут состоять из смеси валунов, гальки, песка и ила, поэтому такие пляжи обладают атрибутами комбинации типов береговой линии. Их эволюция зависит от волнового воздействия и морфологических характеристик. Наиболее часто наблюдаемой динамикой является поворот пляжа в зависимости от преобладающего направления волн [9].

Морфологическая эволюция этих систем определяется волновыми условиями, которые влияют как на гидродинамику на побережье [10], так и на процессы формирования пляжа. Также известно, что морфологическое поведение этих пляжей определяется формой пляжа, типом и наклоном пляжного откоса, размером зерен пляжеобразующего материала и наличием или отсутствием прибрежных отмелей.

Карманные пляжи могут быть чрезвычайно чувствительны к низкочастотным или высокоэнергетическим штормовым явлениям, что продемонстрировали некоторые пляжи на острове Эльба [11]. Карманные пляжи часто подпитываются небольшими водотоками, характеризующимися низкими расходами твердого выноса.

Пляжные отложения, откладываемые местными ручьями в заливах, часто грубые и несортированные [12]. Они находятся в береговых отложениях, которые не могут быть размывы доступной энергией волн [13]. Их особенность в том, что береговой контур со временем ориентируется перпендикулярно к направлению равнодействующей волнений. В результате вдольбереговые перемещения противоположных направлений компенсируют друг друга, и берег сохраняет устойчивость.

Очевидно, и в случае искусственного карманного пляжа, его эволюция будет следовать по тому же пути. Если равнодействующая волнений направлена под углом Θ_R к береговой нормали, то его контур будет со временем разворачиваться таким образом, чтобы данный угол уменьшался и результирующий вдольбереговой перенос затухал (рис. 3). Как видно из рис. 3, полная длина пляжа, а также размеры областей аккумуляции и размыва характеризуются величинами l , l_{Ac} и $(l - l_{Ac})$, соответственно. Средние смещения береговой линии в указанных областях обозначены как E и A , а максимальные — как E_m и A_m .

Баланс наносов в рассматриваемом случае включает три основных составляющих: объемы эрозии (размыва) Er , аккумуляции Ac и байпассинга (выноса материала в обход головы сооружения) Bp :

$$Er = Ac + Bp, \quad (1)$$

причем величину Ac можно выразить в виде:

$$Ac = Er(1 - f_{Bp}), \quad f_{Bp} = \frac{Bp}{Er}, \quad (2)$$

где f_{Bp} — коэффициент байпассинга, выражающий долю материала, покидающего литодинамическую систему.

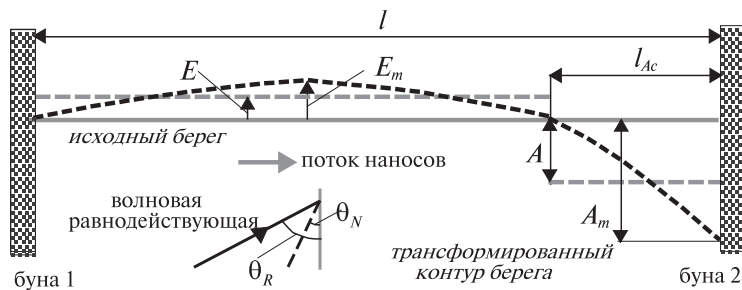


Рис. 3. Изменения контура берега, расположенного между двумя поперечными сооружениями

Fig. 3. Contour changes of a shoreline situated between two transverse structures

Пусть Q_0 — годовой результирующий вдольбереговой поток наносов до строительства буны 2 (рис. 3). Поток Q_1 в последующие годы должен уменьшаться в силу отмеченных изменений контура берега, т. е.

$$Q_I = f_\Theta Q_{I0}, \quad (3)$$

где $f_{\Theta} \leq 1$. Величина f_{Θ} должна зависеть от угла поворота береговой нормали Θ_N относительно начального положения. По мере приближении Θ_N к Θ_R (к углу волновой равнодействующей в начальный момент), значение f_{Θ} должно стремиться к нулю. Текущее значение Θ_N можно оценить, исходя из достигнутых максимальных смещений береговой линии E_m и A_m . В результате приходим к соотношениям:

$$f_{\Theta} = \frac{\Theta_R - \Theta_N}{\Theta_R}, \quad \Theta_N = \arctg\left(\frac{E_m + A_m}{0,5(l + l_{Ac})}\right). \quad (4)$$

В дальнейшем будем использовать значение $\Theta_R = \Theta_{R^*}$ на глубине h_* , маркирующей морскую границу потока наносов (которая определяется позже).

Объем размыва за период времени T после строительства определится как:

$$Er = \int_0^T Q_l dt = Q_{l0} T^*, \quad T^* = \int_0^T f_\Theta dt, \quad (5)$$

где $T^* < T$ имеет смысл виртуального периода времени (при $Q_l = Q_0$ мы имели бы $T^* = T$).

Далее используется понятие активного профиля берега, в пределах которого концентрируются потоки наносов и морфологические изменения дна (рис. 4). Активный профиль располагается между максимальным возвышением пляжа z_m и глубиной замыкания h_* , ограничивающей область существенных штормовых

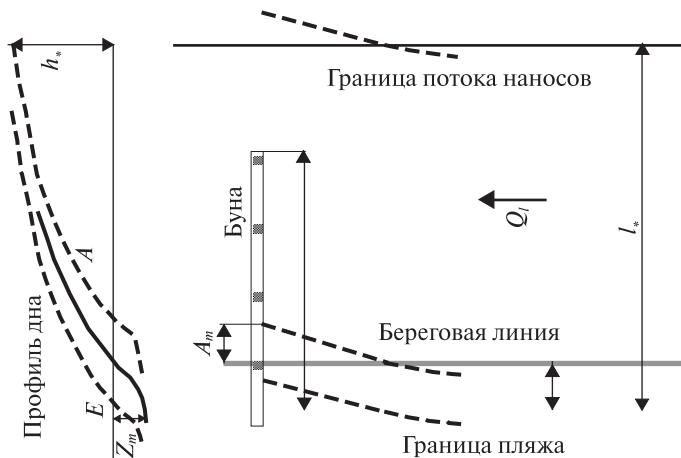


Рис. 4. Параметры активного берегового профиля и его смещения в ходе эволюции

Fig. 4. Parameters of the active coastal profile and its displacement during evolution

деформаций. В пределах длины профиля l_* выделяются: надводный пляж шириной l_b и его подводная часть $l_* - l_b$ (рис. 4). Предполагается, что изменение положения береговой линии сопровождается перемещением всего активного профиля берега как единого целого [14]. Это позволяет определить средние смещения береговой линии E и A в сегментах размыва и аккумуляции в следующем виде:

$$E = \frac{Er}{(h_* + z_m)(l - l_{Ac})}, \quad A = \frac{Ac}{(h_* + z_m)l_{Ac}}. \quad (6)$$

В первом приближении контур берега $S(x)$ можно представить в зоне размыва полуволновой синусоиды, а в зоне аккумуляции — наклонной прямой [15]:

$$S(x) = E_m \sin 2\pi \frac{x}{l - l_{Ac}}, \quad 0 \leq x \leq l - l_{Ac}, \quad E_m = \frac{\pi}{2} E,$$

$$S(x) = -A_m \frac{x - (l - l_{Ac})}{l_{Ac}}, \quad l - l_{Ac} \leq x \leq l, \quad A_m = 2A, \quad (7)$$

где максимальные смещения E_m и A_m определены из геометрических соотношений.

Глубина h_* в (6) выражается через значительную высоту волн H_{s012} , характеризующуюся превышением не более 12 ч в году. Кроме того, h_* зависит от заданного порога деформаций дна Δh_c и при $\Delta h_c = 0,1$ м может быть найдена из соотношения [24]:

$$h_* = \bar{K} H_{s012}, \quad \bar{K} = \left[0,32 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-4/15} + 0,99 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{4/55} \right], \quad (8)$$

где H_0/L_0 — крутизна волн (в типичном случае $h_* = (1,5 \div 1,6) H_{s012}$).

Протяженность области аккумуляции l_{Ac} связана с масштабом зоны влияния сооружения Λ , который зависит как от длины сооружения l_G , так и от ширины потока наносов l_* [3]:

$$\Lambda = \sqrt{l_* l_G} \text{ при } l_G \leq l_*; \quad \Lambda = l_* \text{ при } l_G > l_*. \quad (9)$$

Длина l_G , как и l_* , отсчитывается от верхней границы пляжа (отметки z_m , рис. 4). В условиях достаточно протяженного пляжа область аккумуляции расширяется со временем t , следуя зависимости $l_{Ac} = \Lambda \sqrt{t}$. Однако при ограниченной длине пляжа величине l_{Ac} некуда увеличиваться, и она должна стабилизироваться на значениях $(1 \div 2) \Lambda$. В дальнейших расчетах принято:

$$l_{Ac} = 1,5\Lambda. \quad (10)$$

По мере выдвижения берега у головной части буны 2 объем задержанного материала должен уменьшаться, а объем байпассинга — возрастать. Соответственно коэффициент байпассинга f_{Bp} в (2) можно определить как (рис. 4):

$$f_{Bp} = \frac{l_* - (l_G - A_m)}{l_*}. \quad (11)$$

Очевидно, $f_{Bp} \rightarrow 1$ при $A_m \rightarrow l_G$. Следует также принять во внимание соотношение между длиной сооружения l_G и шириной потока наносов на подводном склоне l_* , (рис. 4). Здесь выделяются случаи короткого сооружения, когда $l_G \leq l_*$, и длинного сооружения, когда $l_G > l_*$. В первом случае соотношение (11) применимо непосредственно. Во втором случае оно применимо при дополнительном условии $A_m > l_G - l_*$. Если же $A_m \leq l_G - l_*$, то $f_{Bp} = 0$.

Таким образом, приведенные зависимости полностью определяют рассматриваемую литодинамическую систему.

Основой для расчетов волнения послужили данные многолетних наблюдений ветрового режима на станции Невская—Порт [16]. Для основных волноопасных направлений составлена табл. 1, где отражены повторяемости наиболее значимых ситуаций со скоростью ветра более 9 м/с.

Повторяемость относится к безледному периоду (апрель—декабрь). Также указаны длины разгона волн и средние глубины акватории для основных направлений.

При использовании рекомендованных формул [17] были рассчитаны средние параметры волн, введенные затем в значительные высоты H_s и ассоциированные периоды волн T_s . Полученные результаты приведены в табл. 2. В крайней правой колонке указана продолжительность действия данной волновой ситуации t_w в течение года.

Таблица 1

Table 1

Исходные данные по ветру

Initial data on wind

Скорость ветра, м/с	Повторяемость, %		
	Ю	ЮЗ	З
9–10 (9,5)	0,298	1,183	4,329
11–12 (11,5)	0,064	0,207	1,216
13–14 (13,5)		0,049	0,350
15–16 (15,5)		0,012	0,052
17–20 (18,5)			0,018
Длина разгона, км	11	16	22
Средняя глубина, м	2,5	4	4

Таблица 2

Table 2

Расчетные параметры волн

Calculated wave parameters

W, м/с	Направление	$\bar{H}$, м	$\bar{T}$, с	H_s , м	T_s , с	t_w , ч
9,5	Ю	0,28	2,12	0,45	2,55	19,7
	ЮЗ	0,38	2,56	0,60	3,07	78,1
	З	0,39	2,63	0,63	3,15	286
11,5	Ю	0,32	2,18	0,50	2,61	4,2
	ЮЗ	0,43	2,65	0,69	3,18	13,7
	З	0,45	2,71	0,71	3,25	80,3
13,5	Ю	—	—	—	—	—
	ЮЗ	0,48	2,71	0,76	3,26	3,2
	З	0,49	2,76	0,78	3,31	23,1
15,5	Ю	—	—	—	—	—
	ЮЗ	0,52	2,76	0,83	3,31	0,8
	З	0,53	2,80	0,84	3,35	3,4
18,5	Ю	—	—	—	—	—
	ЮЗ	—	—	—	—	—
	З	0,58	2,83	0,92	3,40	1,2

Определение волновой равнодействующей основывается на подсчете потоков энергии по волноопасным направлениям. Элементарный поток энергии F равен:

$$F = EC_g \approx 10^3 H^2 T [\text{дж/м/с}], \quad (12)$$

где $E = \frac{1}{8} \rho g H^2$ — энергия волн на единицу площади, $C_g = \frac{1}{2} g T / 2\pi$ — скорость переноса энергии (групповая скорость), ρ — плотность воды, g — ускорение силы тяжести. Меридианная F_{cross} и широтная F_{long} составляющие годовых потоков энергии, а также азимут волновой равнодействующей α_R определяются соотношениями:

$$F_{cross} = \sum_j \sum_i (F_{t_w})_{ij} \cos \alpha_j, \quad F_{long} = \sum_j \sum_i (F_{t_w})_{ij} \sin \alpha_j, \quad \tan \alpha_R = \frac{F_{cross}}{F_{long}}, \quad (13)$$

где индексы j и i относятся к данному направлению и данной высоте (и периоду) волн, соответственно.

В данном случае азимут волновой равнодействующей равен $\alpha_R = 261^\circ$. Азимут рассматриваемого берега близок к 300° , а азимут его нормали $\alpha_N = 210^\circ$. Следовательно, угол равнодействующей относительно береговой нормали составляет $\Theta_R = \alpha_R - \alpha_N = 51^\circ$.

Согласно данным табл. 2, значительная высота волн $H_{s012} = 0,8$ м, а ассоциированный период $T_{s012} = 3,3$ с. Тогда глубина замыкания, согласно (8), равна $h_* = 1,2$ м. Расчет рефракции волн (с периодом T_{s012}) дает величину угла волновой равнодействующей на глубине замыкания $\Theta_{R*} = 30^\circ$.

Таблица 3

Table 3

Вдольбереговые потоки наносов, $10^3 \text{ м}^3/\text{год}$
Longshore sediment fluxes, $10^3 \text{ m}^3/\text{year}$

Румб	Ю	ЮЗ	З
Θ_0 , град.	-30	15	60
$\Sigma Q_{t_{wi}}$	-0,06 (-0,05)	0,35 (0,28)	2,38 (1,90)
Θ_{net}	2,67 (2,13)		

Вдольбереговой расход наносов Q , выраженный в $\text{м}^3/\text{ч}$, можно определить по формуле [18]:

$$Q = 0,005\mu_h \left(0,8 + 0,02 \frac{\sqrt{gh_B}}{w_g} \right) H_{rmsB}^2 \sqrt{gh_B} \sin \Theta_B \cos \Theta_B, \quad (14)$$

где $\mu_h = 3600 \left[(\rho_g / \rho - 1)(1 - \sigma) \right]^{-1}$, ρ_g / ρ — отношение плотности твердых частиц к плотности воды, σ — пористость песчаного грунта, g — ускорение силы тяжести, w_g — скорость осаждения твердых частиц (гидравлическая крупность), H_{rmsB} — среднеквадратичная высота на глубине обрушения h_B , где угол подхода волн характеризуется значением Θ_B .

Результирующий поток наносов Q_{net} рассчитывается как

$$Q_{net} = \sum_j \sum_i (Q_{t_w})_{ij}, \quad (15)$$

где t_w — продолжительность действия данного расхода (в часах в год), а индексы i и j относятся к данной высоте волн и их направлению, соответственно.

Результаты расчетов потоков наносов представлены в табл. 3. Расчеты проведены для двух характерных размеров песка на рассматриваемом пляже — 0,3 и 0,4 мм (для последнего значения даны в скобках). Далее используем среднюю величину потока $2,4 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$.

3. Результаты и обсуждение

В среднем интенсивность размыва пляжа составляет 4,5 м/год. Таким образом, в естественном состоянии пляж может быть полностью размыв уже через 10 лет до подпорной стенки (променада). Все исходные данные для прогноза отражены в табл. 4 [19], Характерный береговой профиль, на основе которого оценены параметры пляжа, показан на рис. 5.

Таблица 4

Table 4

Исходные параметры для расчетов
Initial parameters for calculations

Θ_{R^*} , град.	Q_0 , $10^3 \text{ м}^3/\text{год}$	l , м	h_* , м	z_m , м	l_* , м	l_G , м	Λ , м
30	2,4	600	1,2	2,0	120	120	120

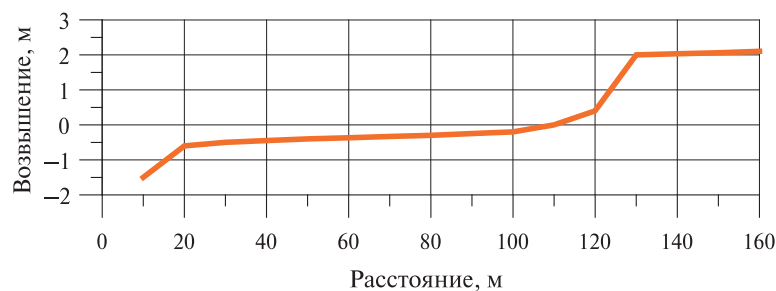


Рис. 5. Типичный профиль берега в районе исследования

Fig. 5. Typical coastal profile in the study area

Полученные результаты представлены в табл. 5. Здесь отражены прогнозируемые изменения основных динамических показателей в течение ближайших 20 лет, а именно, вдольберегового потока наносов, объемов размыва, аккумуляции и байпассинга, а также максимальных смещений береговой линии в областях размыва и аккумуляции. Эти результаты также показаны в графической форме на рис. 6–8.

Как видно на рис. 6, вдольбереговой поток наносов со временем заметно уменьшается, что обуславливается разворотом контура берега и уменьшением угла волновой равнодействующей относительно береговой нормали. Объемы размыва и аккумуляции увеличиваются со временем, скорость процессов размыва и аккумуляции замедляется (рис. 7).

За 20 лет размыв достигнет величины 28 тыс. м³, а аккумуляция у сооружения (буны 3) — 15,4 тыс. м³. Соответственно вынос материала с пляжа в обход головы сооружения (байпассинг) составит 12,6 тыс. м³. Причем, из рис. 7 видно, что объем байпассинга растет со временем почти линейно.

Что касается смещений береговой линии, то они также увеличиваются со временем, но скорость процесса в зонах размыва и аккумуляции различна. Берег выдвигается у сооружения особенно быстро в первые годы после строительства. Затем процесс постепенно замедляется, но за 20 лет берег выдвинется более чем на 50 м. Отступление берега в зоне размыва происходит более равномерно — замедляется со временем. За 20 лет отступление берега составит около 30 м.

На рис. 9 показаны изменения контура берега, ожидаемые в течение ближайших 20–30-ти лет в условиях создаваемых сооружений (буна 2 и буна 3). Очевиден разворот берега по часовой стрелке, что обусловлено стремлением контура к равновесному положению по отношению к волновой равнодействующей. Скорость размыва пляжа снижается, зона размыва локализуется в центральной части между бунами 2 и 3. Полный размыв данной локальной части пляжа прогнозируется через 20–30 лет.

Таблица 5

Table 5

Прогнозируемые показатели эволюции пляж
Predicted indicators of beach evolution

Годы	Поток наносов, 10 ³ м ³ /год	Объем размыва, 10 ³ м ³	Объем аккумуляц., 10 ³ м ³	Объем байпас., 10 ³ м ³	Отступ. берега, м	Выдвиг. берега, м
1	2,30	2,30	2,17	0,13	2,7	7,5
3	2,09	6,34	5,38	0,96	7,4	18,7
5	1,94	9,84	7,68	2,16	11,5	26,7
7	1,85	13,0	9,45	3,52	15,1	32,8
10	1,70	17,3	11,5	5,66	20,0	39,8
13	1,58	20,8	13,0	7,81	24,3	45,2
15	1,54	23,1	13,8	9,21	26,9	48,1
18	1,44	26,2	14,9	11,3	30,6	51,8
20	1,39	28,0	15,4	12,6	32,7	53,7

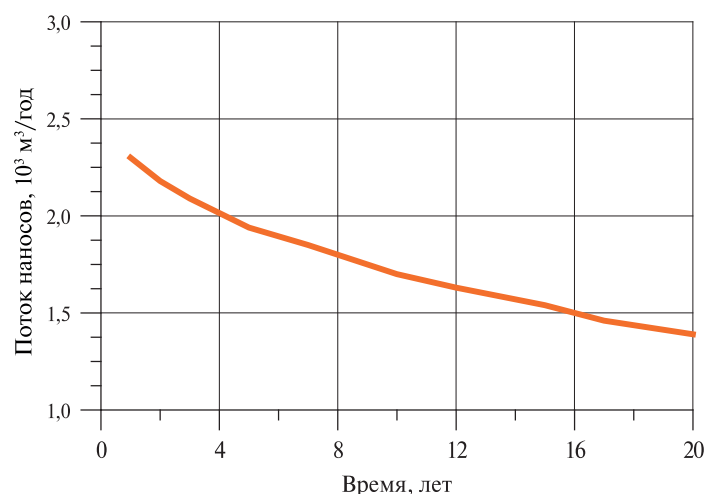


Рис. 6. Прогнозируемые изменения вдольберегового потока наносов

Fig. 6. Predicted changes in longshore sediment flow

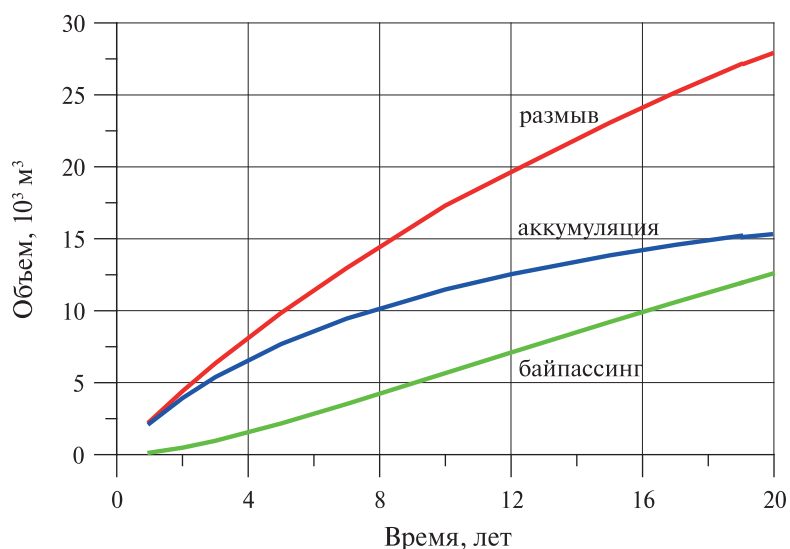


Рис. 7. Прогнозируемые объемы размыва, аккумуляции и байпасинга

Fig. 7. Predicted scour, accumulation, and bypass volumes

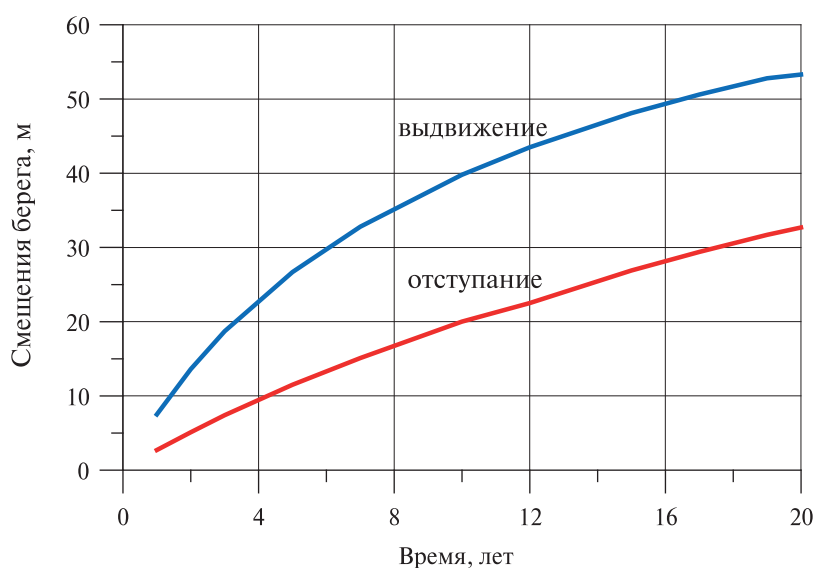


Рис. 8. Максимальные смещения береговой линии в функции времени

Fig. 8. Maximum shoreline displacements as a function of time

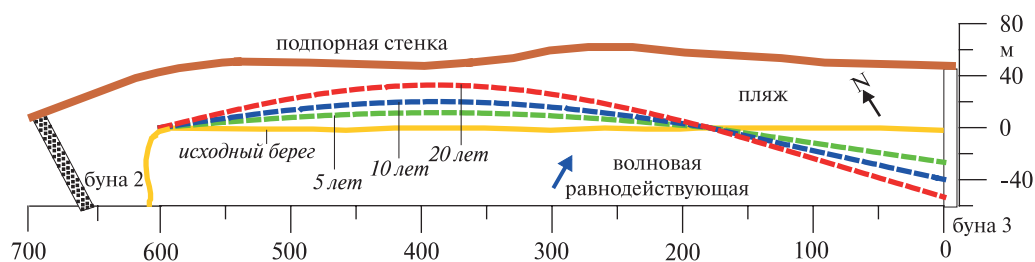


Рис. 9. Ожидаемая эволюция контура берега

Fig. 9. Expected evolution of the coastal contour

Таким образом, планируемое строительство сооружений существенно замедлит процесс размыва пляжа и локализует зону интенсивного размыва, хотя и не сможет полностью прекратить процесс размыва. Безвозвратный вынос материала значительно уменьшится, одновременно будет запущен процесс перестройки контура пляжа, который будет сопровождаться локальным отступанием уреза в центральной части пляжа и накоплением материала в районе бун 2 и 3.

Район строительства находится в 5-балльной сейсмической зоне, и поэтому на глубину и интенсивность размыва может оказывать влияние разжижение грунта, которое может произойти при повышении порового давления при сейсмических нагрузках в грунтах. Существует два типа механизмов разжижения в грунте морского дна: мгновенное разжижение и остаточное разжижение [20]. Мгновенное разжижение может происходить только в очень плотном песке. Его влияние на устойчивость сооружений незначительно. Однако мгновенное разжижение может усилить размыв грунта морского дна вокруг сооружений. Остаточное разжижение в основании морского дна оказывает негативное влияние на устойчивость сооружений.

Глубина разжижения может составлять до половины высоты волны [21], что непременно скажется на устойчивости берегозащитных сооружений, а также профиле береговой линии. В дальнейшем требуется сделать оценку возможного разжижения грунта по методике, описанной в [22]. С учетом полученных результатов необходимо выполнить пересчет результатов данного исследования, если это будет обосновано. Деградиация рассматриваемой размываемой части берега связана главным образом с действием заметного вдольберегового транспорта наносов. Следовательно, для ослабления негативных явлений необходимо уменьшить вдольбереговой поток.

Для развития вдольберегового потока требуется определенный участок «разгона», на котором он постепенно насыщается наносами. Если длина берега l_b , где поток может беспрепятственно развиваться, значительно превышает ширину потока l_* , то поток достигает насыщения. Если же показатели l_b и l_* сравнимы по величине, то поток не в состоянии набрать силу. Следовательно, поток можно регулировать с помощью литодинамических барьеров — сооружений, ограничивающих участок «разгона». К ним относятся, например, буны и волноломы.

Одним из вариантов дальнейшей (перспективной) защиты берега, вероятно, могло бы быть строительство волноломов из каменной наброски, расположенных вдоль берега с определенным интервалом, масштабом которого, вероятно, может служить ширина вдольберегового потока l_* . В рассматриваемом случае $l_* = 120$ м. С учетом общей длины пляжа около 600 м, при выборе шага порядка l_* достаточно было бы пары волноломов, расположенных в зоне потенциального размыва (рис. 10). Длина волноломов, по-видимому, также может быть связана с шириной потока наносов l_* , а глубина расположения — с глубиной замыкания h_* (в данном случае 1,2 м).

Также не исключен вариант с бунами, которые перехватывают поток наносов в пропорции отношения их длины l_G к ширине потока l_* . Согласно [23], расстояние между бунами не должно превышать величину 2Λ , где Λ — область влияния сооружения (формула (9)). Тогда при длине сооружений $l_G = l_*$ было бы достаточно построить две буны в зоне потенциального размыва.

Очевидно, выбор варианта берегозащиты нуждается в дальнейшем обосновании, в том числе, и экономическом. Независимо от этого, насущной задачей является пополнение запаса материала на пляже, который значительно истощился за последнее десятилетие.

4. Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

— строительство гидротехнических сооружений в рамках проекта «База водных видов спорта в Приморском районе» позволит существенно снизить скорость размыва пляжа «Парка 300-летия Санкт-Петербурга»

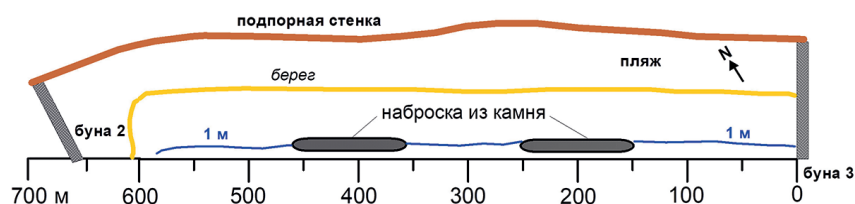


Рис. 10. Один из возможных вариантов берегозащиты

Fig. 10. One of the possible options for bank protection

и уменьшить (локализовать) зону размыва. При этом полностью процесс размыва остановлен не будет. Прогнозируемый срок размыва локальной центральной зоны пляжа до подпорной стенки — до 30-ти лет (вместо 10-ти лет в существующих условиях);

— строительство указанных сооружений, в комплексе с дополнительными мерами, может стабилизировать состояние рассматриваемой береговой части «Парка 300-летия Санкт-Петербурга».

В качестве основных вариантов мероприятий для такой стабилизации рекомендуется:

— строительство сооружений и регулярное пополнение (восстановление) пляжа песчаным материалом в локальной центральной размываемой зоне;

— строительство сооружений и строительство в перспективе локальных волноломов из каменной наброски длиной около 200 м.

Литература

1. Отчет 1290–2020.ИГМИ. Технический отчет по результатам инженерно–гидрометеорологических изысканий. АО «Фирма УНИКОМ», 2020.
2. Леонтьев И.О., Хабидов А.Ш. Моделирование динамики береговой зоны. Обзор современных исследований. Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Институт водных и экологических проблем СО РАН. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2009. 90 с.
3. Hanson H., Baquerizo Azofra A., Falqué A., Lomonaco P., Payo A. Contour–line models as tools for long–term coastal evolution // Jornadas sobre Avances en Ingenieria Ingenieria de Costas y Oceanografia Operacional, Real Academia de Ingenieria. 2004. P. 17–52. doi:10.13140/RG.2.1.4089.5524
4. Hanson H. GENESIS: a generalized shoreline changes numerical model // Journal of Coastal Research. 1989. Vol. 5, No. 1. P. 1–27.
5. Kantarzh I., Mordvintsev K., Gogin A. Numerical analysis of the protection of a harbor against waves // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53. doi:10.1007/s10749-019-01092-y1
6. Леонтьев И.О. Изменения береговой линии моря в условиях влияния гидротехнических сооружений // Океанология. 2007. Т. 47, № 2. С. 940–946.
7. Badiei P., Kamphuis J.W., Hamilton D.G. Physical experiments on the effects of groins on shore morphology // 24th Int. Conf. on Coastal Eng. Kobe, Japan. 1994. P. 1782–1796. doi:10.1061/9780784400890.129
8. Kantarzh I., Zheleznyak M., Leont'yev I. Modeling and monitoring of the processes in the coastal zone of Imeretinka lowland, black sea, Sochi // Proceedings of Managing risks to coastal regions and communities in a changing world conference. 2017. doi:10.31519/conferencearticle_5b1b943667afd8.23141830
9. Baloui Y., Belon R. Evolution of Corsican pocket beaches // Journal of Coastal Research. 2014. Vol. 70, No. 10070. P. 96–101. doi:10.2112/SI70-017.1
10. Short A.D., Masselink G. Embayed and structurally controlled beaches // Handbook of beach and shoreface dynamics. Chichester, England: John Wiley and Sons. 1999. 392 p.
11. Pranzini E., Rosas V., Jackson N.L., Nordstrom K.F. Beach changes due to sediment delivered by streams to pocket beaches during a major flood // Geomorphology. 2013. Vol. 199. P. 36–47. doi:10.1016/j.geomorph.2013.03.034
12. Izumi N., Shuto N., Tanaka H. Instability of River Mouth locations in pocket beaches // American Society of Civil Engineers. Coast. Sed. 1999. P. 628–643.
13. Pranzini E., Rosas V. Pocket beach response to high energy e low frequency floods (Elba Island, Italy) // Journal of Coastal Research. 2007. SI 50. P. 969–977.
14. Bruun P. The Bruun rule of erosion by sea–level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages // Journal of Coastal Research. 1988. Vol. 4, No. 4. P. 627–648.
15. Леонтьев И.О. Изменения контура берега, вызванные поперечным сооружением в береговой зоне моря // Геоморфология. 2018. № 3. С. 32–39. doi:10.7868/S0435428118030033
16. Отчет о НИР «Математическое моделирование нагонов, течений, волнения и размывов дна в Невской губе и устье реки Невы». Санкт-Петербург: ООО «КАРДИНАЛ софт», 2016.
17. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Ленинград: ВНИИ гидротехники им. Б.Е. Веденеева, 1990. 432 с.
18. Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с.
19. ФГБУ «ВСЕГЕИ» Экспертное мнение по строительству объекта «База водных видов спорта в Приморском районе». Санкт-Петербург, 2021.
20. Kuprin A.V., Novakov A.D., Kantarzh I.G., Gubina N.A. Local and general scours caused by tsunami waves // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 54, No. 6. P. 836–840. doi:10.1007/s10749-021-01296-1

21. Куприн А.В., Кантаржи И.Г. Типы размывов от волн цунами, воздействующих на гидротехнические сооружения // Гидротехника. 2020, № 4(61). С. 48–50.
22. Ishihara K., Yamazaki A. Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand // Soils Found. 1984. Vol. 24, No. 3. P. 85–100. doi:10.3208/sandf1972.24.3_85
23. Леонтьев И.О., Акивис Т.М. О воздействии системы бун на песчаный берег // Океанология. 2020. Т. 60, № 3. С. 474–484. doi:10.31857/S0030157420030041
24. Леонтьев И.О. К определению глубины замыкания у песчаного берега // Океанология. 2022. Т. 62, № 2. С. 301–308. doi:10.31857/S0030157422020101

References

1. Report 1290–2020.IGMI. Technical report on the results of engineering and hydrometeorological surveys. AO «Firma UNIKOM, 2020 (in Russian).
2. Leont'ev I.O., Khabidov A. Sh. Modeling the dynamics of the coastal zone. A review of current research. P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Institute of Water and Ecological Problems SB RAS. Novosibirsk, Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2009, 90 p. (in Russian).
3. Hanson H., Baquerizo Azofra A., Falqué A., Lomonaco P., Payo A. Contour-line models as tools for long-term coastal evolution. *Jornadas sobre Avances en Ingenieria Ingenieria de Costas y Oceanografia Operacional, Real Academia de Ingenieria*. 2004, 17–52. doi:10.13140/RG.2.1.4089.5524
4. Hanson H. GENESIS: A generalized shoreline changes numerical model. *Journal of Coastal Research*. 1989, 5(1), 1–27.
5. Kantarzhi I., Mordvintsev K., Gogin A. Numerical Analysis of the Protection of a Harbor Against Wave. *Power Technology and Engineering*. 2019, 53. doi:10.1007/s10749-019-01092-y1
6. Leont'yev I.O. Changes in the shoreline caused by coastal structures. *Oceanology*. 2007, 47, 877–883. doi:10.1134/S0001437007060124
7. Badiel P., Kamphuis J.W., Hamilton D.G. Physical experiments on the effects of groins on shore morphology. *24th Int. Conf. on Coastal Eng. Kobe, Japan*. 1994, 1782–1796. doi:10.1061/9780784400890.129
8. Kantarzhi I., Zheleznyak M., Leont'yev I. Modeling and monitoring of the processes in the coastal zone of Imeretinka lowland, Black Sea, Sochi. *Proceedings of Managing risks to coastal regions and communities in a changing world conference*, 2017. doi:10.31519/conferencearticle_5b1b943667afd8.23141830
9. Baloui Y., Belon R. Evolution of Corsican pocket beaches. *Journal of Coastal Research*. 2014, 70(10070), 96–101. doi:10.2112/SI70-017.1
10. Short A.D., Masselink G. Embayed and structurally controlled beaches. *Handbook of beach and shoreface dynamics*. Chichester, England: John Wiley and Sons. 1999, 392 p.
11. Pranzini E., Rosas V., Jackson N.L., Nordstrom K.F. Beach changes due to sediment delivered by streams to pocket beaches during a major flood. *Geomorphology*. 2013, 199, 36–47. doi:10.1016/j.geomorph.2013.03.034
12. Izumi N., Shuto N., Tanaka H. Instability of River Mouth locations in pocket beaches. *American Society of Civil Engineers. Coast. Sed.* 1999, 628–643.
13. Pranzini E., Rosas V. Pocket beach response to high energy e low frequency floods (Elba Island, Italy). *Journal of Coastal Research*. 2007, SI 50, 969–977.
14. Bruun P. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research*. 1988, 4, 627–648.
15. Leont'yev I.O. Changes in shoreline contour due to cross-shore structure in the sea coastal zone. *Geomorfologiya*. 2018, 3, 32–39. doi:10.7868/S0435428118030033
16. Report on research “Mathematical modeling of surges, currents, waves and bottom scouring in the Neva Bay and the mouth of the Neva River”. *ООО “KARDINAL soft”, St. Petersburg*, 2016 (in Russian).
17. Lappo D.D., Strekalov S.S., Zav'yalov V.K. Loads and effects of wind waves on hydraulic structures. *Leningrad, VNIИ gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*, 1990. 432 p. (in Russian).
18. Leont'ev I.O. Morphodynamic processes in the coastal zone of the sea. *Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing*. 2014. 251 p. (in Russian).
19. Expert opinion on the construction of the facility “Water Sports Base in Primorsky District”. *Vserossiyskij nauchno-issledovatel'skij geologicheskij institut im. A.P. Karpinskogo, St. Petersburg*, 2021 (in Russian).
20. Kuprin A.V., Novakov A.D., Kantarzhi I.G., Gubina N.A. Local and general scours caused by tsunami waves. *Power Technology and Engineering*. 2021, 54, 6, 836–840. doi:10.1007/s10749-021-01296-1
21. Kuprin A.V., Kantarzhi I.G. Types of scour from tsunami waves affecting hydraulic structures. *Gidrotekhnika*. 2020, 4(61), 48–50 (in Russian).

22. *Ishihara K., Yamazaki A.* Analysis of wave—induced liquefaction in seabed deposits of sand. *Soils Found.* 1984, 24 (3), 85—100. doi:10.3208/sandf1972.24.3_85
23. *Leont'yev I.O., Akivis T.M.* The effect of a groin field on a sandy beach. *Oceanology.* 2020, 60(3), 412—420. doi:10.1134/S0001437020030042
24. *Leont'yev I.O.* Evaluation of depth of closure on a sandy coast. *Oceanology.* 2022, 62(2), 258—264. doi:10.1134/S0001437022020102

Об авторах

КАНТАРЖИ Измаил Григорьевич, РИНЦ Author ID: 1086368, ORCID ID: 0000-0002-0587-4722, Scopus Author ID: 6602848417, 57200265787, WoS Researcher ID: A-1922—2014, kantardgi@yandex.ru

ЛЕОНТЬЕВ Игорь Олегович, РИНЦ Author ID: 58658, ORCID ID: 0000-0002-5010-6239, Scopus Author ID: 6603383591, WoS Researcher ID: R-8051—2016, igor.leontiev@gmail.com

КУПРИН Александр Васильевич, РИНЦ Author ID: 1101401, ORCID ID: 0000-0002-4186-2753, Scopus Author ID: 57222865129, rtyter55@gmail.com