

УДК 551.435.3

## К ПРОБЛЕМЕ ЗАЩИТЫ БЕРЕГОВ КУРОРТА ВАРАДЕРО (КУБА) ИСКУССТВЕННЫМ ПЛЯЖЕМ

© 2020 г. Н. Н. Дунаев<sup>1</sup>, \*, И. О. Леонтьев<sup>1</sup>, \*\*, J. L. J. Marti<sup>2</sup>, \*\*\*<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Морской институт, Гавана, Куба\*e-mail: [dunaev@ocean.ru](mailto:dunaev@ocean.ru)\*\*e-mail: [igor.leontiev@gmail.com](mailto:igor.leontiev@gmail.com)\*\*\*e-mail: [juanes@ceniai.inf.cu](mailto:juanes@ceniai.inf.cu)

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.

После доработки 03.03.2020 г.

Принята к публикации 08.04.2020 г.

Современная динамика берегов курорта Варадеро, расположенного на п-ве Икакос (северное побережье Кубы), характеризуется тенденцией постепенного размыва и деградации пляжей. В данной работе рассматривается возможность защиты берега с помощью искусственного пляжа, сохраняющего устойчивость при экстремальных штормовых воздействиях. С помощью модели [4, 9] оцениваются параметры защитного пляжа, созданного из биогенного песка, широко распространенного в рассматриваемом регионе. Показано, что для строительства пляжа в центральной части п-ова Икакос подходит песок с крупностью больше 0.4 мм. Максимальное возвышение пляжа должно быть не меньше 3.3 м. При планируемом выдвигании берега на 10, 20 или 30 м потребуются объем песка около 100, 180 или 250 м<sup>3</sup> м<sup>-1</sup> соответственно. В корневой части п-ва Икакос, характеризующейся сравнительно крутым береговым склоном, создание искусственного пляжа оказывается экономически нецелесообразным, и здесь следует применить иные способы берегозащиты.

**Ключевые слова:** размыв берегов, искусственный пляж, биогенный песок, профиль равновесия, моделирование

DOI: 10.31857/S0030157420040085

### ВВЕДЕНИЕ

Расположенная в условиях влажного тропического климата Республика Куба входит в число малых островных государств, которым уделяется разностороннее внимание ООН, принявшей программу по устойчивому их развитию на международной конференции 1994 г. в г. Бриджтаун (Барбадос). В числе конкретных мероприятий по реализации программы является международное сотрудничество в разных направлениях укрепления их потенциала. Применительно к Кубе одним из таких направлений обозначено расширение международного туризма на основе привлекательности прибрежно-морского курортного отдыха. Жемчужиной такого курорта является Варадеро, песчаные пляжи которого, протянувшиеся примерно на 10 км, на протяжении последних десятилетий входят в пятерку лучших пляжей нашей планеты, а в 2019 г. заняли второе место по данным крупнейшего туристического сайта TripAdvisor [11]. При этом природная динамика пляжей и отмечаемый с 70-х годов XX в. их перманентный размыв вызывают большую тревогу. Поскольку доход от туризма в Варадеро составляет

более 40% от дохода этой хозяйственной отрасли, решение проблемы устойчивости его пляжей весьма актуально. Фрагментарное разновременное искусственное намывание песка в район пляжей временно стабилизирует их размыв, но обходится дорого и не решает проблему в долгосрочном плане [8, 10].

Одним из перспективных способов берегозащиты в настоящее время считается строительство искусственных пляжей. В данной работе оцениваются возможности их применения для защиты берегов Варадеро с учетом геолого-геоморфологических, климатических и гидрологических условий региона, а также свойств пляжеобразующего материала. На основе математического моделирования определяются оптимальные параметры искусственного пляжа, а также оцениваются потенциальные потери материала в ходе его эксплуатации.

### ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ РЕГИОНА

Пляжи курорта Варадеро расположены по западному побережью полуострова Икакос, кото-

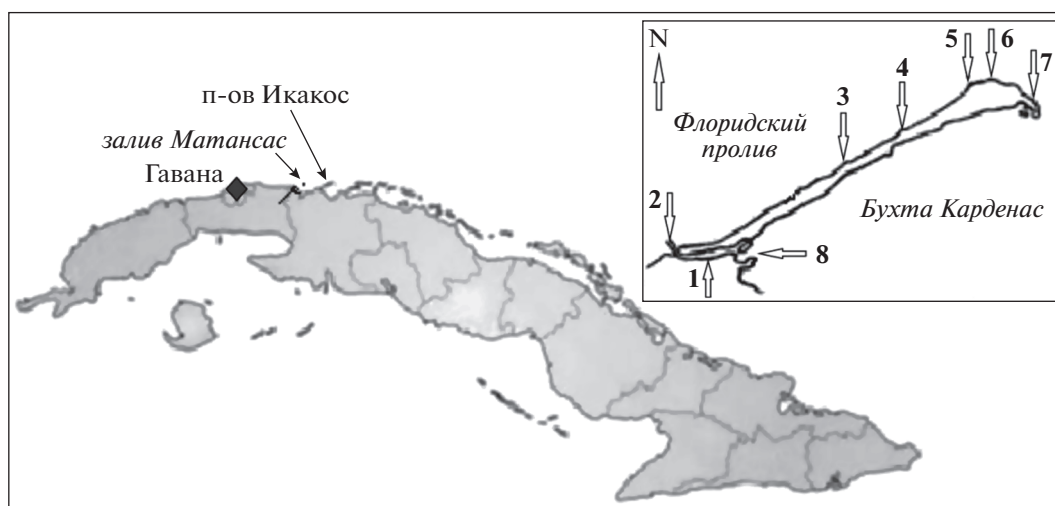


Рис. 1. Местоположение полуострова Икакос. На врезке: 1 – лагуна Пасо–Мало, 2 – канал Пасо–Мало, 3 – м. Бернардино, 4 – м. Чапелин, 5 – м. Франсез, 6 – м. Икакос, 7 – м. Молас, 8 – канал Кавама.

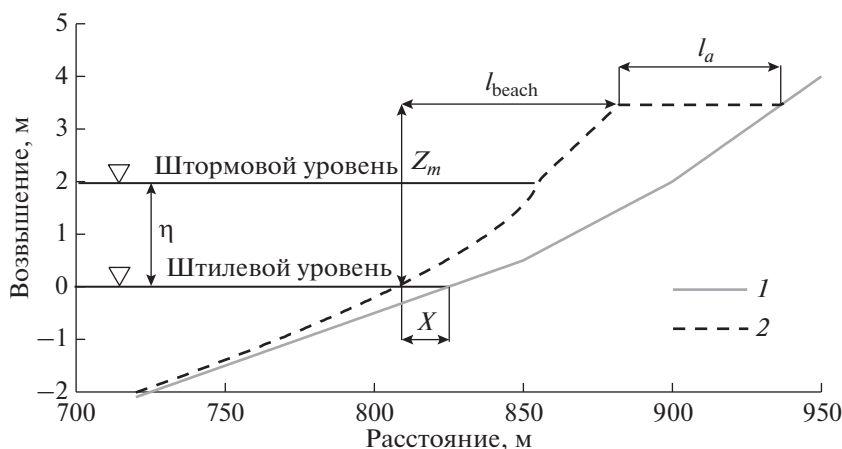
рый находится в 130 км к востоку от Гаваны. Памятуя напутствие основоположника **научного подхода** к защите морских берегов А. ван Виерлинга (1507–1579 гг.) избегать локального подхода к проблеме, кратко рассмотрим геолого-геоморфологические и ветро-волновые условия исследуемой территории.

Полуостров Икакос протягивается в северо-восточном ( $70^\circ$ ) направлении на расстояние 22 км при ширине в основании 0.5 км и до 1.2–2.5 км по мере приближения к дистали. С 1956 г. он практически является островом в результате строительства в его основании канала Пасо-Мало, обеспечивающего проход маломерных плавсредств из бухты Карденас во Флоридский пролив (рис. 1).

По форме полуостров Икакос напоминает косу – береговую аккумулятивную форму азовского типа. Его рельеф представлен низкой (в среднем 10 м) абразионно-аккумулятивной равниной с несколькими останцами коренных карбонатных пород, максимальная отметка которых составляет 27 м. В ландшафте выделяются абразионные террасы высотой 2–3, 5–7 и 10–15 м. Восточный берег полуострова наиболее низкий (1.0–1.5 м) и отличается развитием болот и мангровой растительности. Западный берег характеризуется песчаными пляжами шириной 20–30, а местами до 50 м. На трех участках к урезу воды выходят коренные породы калькарениты (известняковые песчаники), образуя мысы с хорошо выраженными клифами высотой до 8–12 м. В них выработаны ниши глубиной 1.0–1.5 м и высотой до 0.5 м. Возраст рельефа полуострова молодой, не древнее позднего неоплейстоцена [1, 10]. Его эволюция от структурно-денудационного к абразионно-аккумулятивному типу обусловлена главным

образом новейшей тектоники и воздействием сангамонской ( $Q_3^1$ ) и фландрской ( $Q_4$ ) кинематикой уровня моря. Современный профиль и облик береговой зоны сформировался в основном в последние 2.5 тыс. лет, когда климатические условия стали практически идентичными современным, а глобальная гидрокинематика морского уровня стала относительно спокойной без существенных колебаний.

Геологическое строение полуострова Икакос в своей основе представлено останцами упомянутых калькаренитов миоценового ( $N_1$ ) возраста, которые в период сангамонской трансгрессии соединились песчаными пересыпями, образовавшими золианиты. В результате полуостров получил близкий современному вид. Голоценовые отложения с западной стороны представлены преимущественно морским органогенным среднезернистым песком пляжей (медианный диаметр  $M_d \approx 0.3$ , коэффициент сортировки  $S_0 \approx 1.43$ ) с незначительной (доли процента) примесью хемогенного компонента в виде микроолитов и ограниченно органогенной конгло-брекчией террасы “себоручо”, а с восточной – преимущественно отложениями болот и небольших мелководных лагун. В состав песка обычно входят бентосные фораминиферы (часто более 50%), детрит раковин моллюсков (20–35%), карбонатные чешуйки халимедовых водорослей (15–30%) и компоненты рифов (1–3%). Поступление в береговую зону абразионного материала слишком мало, чтобы заметно проявиться в количестве и динамике прибрежных наносов [8]. В тектоническом отношении полуостров представлен разломно-блоковой структурой, осложняющей центрикли-



**Рис. 2.** Параметры искусственного пляжа. 1 — естественный профиль, 2 — профиль искусственного пляжа. Обозначения в тексте.

наль неотектонического прогиба Ремедиос, ограничивающего с севера о. Кубу [3].

Гидрометеоусловия исследуемого района во многом определяют северо-восточные пассатные и северо-западные антициклональные ветры. Высота генерируемых ими морских волн в первом случае редко превышает 1 м, а во втором иногда может превышать 3 м, что оказывает разрушительное воздействие на пляжи полуострова. В то же время замечено, что в перестройке профиля береговой зоны играет роль не только сила волнения, но также тип волн, включая их угол подхода к пляжу. Заметные изменения вызывают фронтальные или подходящие под небольшим углом относительно крутые ветровые волны высотой 0.6–0.8 м. В сезонной динамике пляжа Варадеро отчетливо выделяются две фазы: длительная весенне-летняя фаза аккумуляции при ветрах восточных румбов и краткая осенне-зимняя фаза размыва при северо-западных ветрах [5]. Штормовое воздействие на шельф прослеживается до глубин около 10 м [1].

Экстремальные шторма, как правило, сопровождаются высокими нагонами, вызывающими частичное или полное затопление пляжа, а иногда и полное исчезновение отдельных его участков. Непосредственное воздействие морских волн на пляж и примыкающую авандюну приводит к их размывам и выносу значительных объемов песка на подводный склон. Часть его безвозвратно перемещается мористее береговой зоны и даже за бровку шельфа, которая в западной половине п-ова Икакос располагается достаточно близко (0.5–1 км) к берегу. Из-за отсутствия дополнительных источников материала потери не восполняются, и пляжи постепенно деградируют.

## ПАРАМЕТРЫ ИСКУССТВЕННОГО ПЛЯЖА

Искусственный пляж должен отвечать условию равновесия по отношению к экстремальным

штормовым воздействиям, что в итоге должно минимизировать возможные размывы берега в длительной перспективе. На рис. 2 показан пример взаимного расположения естественного и проектируемого профилей берега, а также отмечены основные параметры искусственного пляжа. Здесь  $X$  — расстояние, на которое планируется выдвинуть существующий пляж,  $Z_m$  — высота пляжа, учитывающая штормовой нагон, прилив и высоту волнового заплеска,  $l_{\text{beach}}$  — ширина пляжа от уреза до бровки бермы,  $l_a$  — ширина бермы, содержащей необходимый запас материала. Кроме того, одним из главных показателей проекта является объем наносов  $V$ , требуемый для строительства пляжа.

Все названные параметры зависят как от показателей шторма (высоты и периода волн, высоты штормового нагона), так и от размера твердых частиц, из которых строится пляж и, в принципе, могут быть определены на основе существующих моделей [4, 6, 9].

Эти модели, однако, разработаны для терригенных наносов, тогда как пляжи Варадеро сложены биогенными осадками с иными физическими свойствами. Правда, морфологические черты береговых профилей, сложенных биогенным и терригенным песком, не обнаруживают существенных различий. В обоих случаях отмечается развитие систем подводных валов со сходными параметрами, а наблюдаемые уклоны биогенных пляжей Варадеро того же порядка, что и на песчаных берегах Черного моря или Балтики. Тем не менее, в расчеты искусственного пляжа следует ввести определенные коррективы.

Профиль равновесия песчаного берега, как известно, аппроксимируется зависимостью [6]:

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

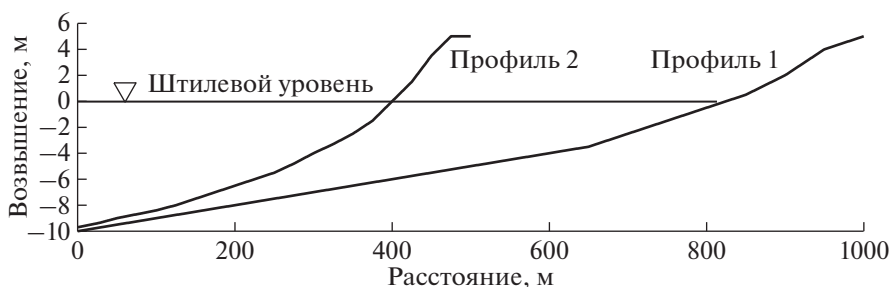


Рис. 3. Схематизированные береговые профили в центральной (профиль 1) и корневой (профиль 2) частях п-ова Икакос.

где  $h$  – глубина,  $x$  – расстояние от берега. Параметр  $A$  зависит от размера твердых частиц  $d_g$ , и для терригенного среднезернистого песка или гравия ( $0.4 < d_g < 10$  мм) определяется соотношением

$$A = 0.23d_g^{0.32}, \tag{2}$$

где  $d_g$  измеряется в мм. Исследования [7] подтверждают применимость формулы (1) и к пляжам Варадеро при использовании зависимости

$$A = 0.16d_g^{0.22}. \tag{3}$$

Из сравнения (2) и (3) следует, что при одинаковой крупности песка биогенный пляж оказывается более пологим, чем терригенный.

Таблица 1. Исходные волновые параметры

$\bar{H}$ , м	$\bar{T}$ , с	$\eta$ , м	$h_B$ , м
3.0	8.3	2.0	8.2

Таблица 2. Параметры профиля искусственного пляжа (профиль 1)

$d_g$ , мм	$X$ , м	$Z_m$ , м	$l_{beach}$ , м	$l_a$ , м	$V$ , м <sup>3</sup> /м
0.4	10	3.2	87	28	188
	10			32	115
0.5	20	3.3	83	43	196
	30			52	281
0.6	10	3.4	80	38	103
	20			48	179
0.7	30	3.4	77	58	258
	10			42	96
0.8	20	3.5	75	52	168
	30			62	244
0.8	10	3.5	75	46	103
	20			55	162
	30			65	236

Дальнейшие расчеты искусственного пляжа основываются на модели [4] с учетом формулы (3).

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Пляжи, нуждающиеся в защите, располагаются в центральной и корневой частях п-ова Икакос. Здесь выделяются два характерных типа береговых профилей, синтезированных по материалам исследований [5]. Они показаны на рис. 3 и характеризуют наиболее крупномасштабные черты морфологии (подводные валы и неоднородности дна не отражены). Сравнительно пологий профиль 1 относится к центральной части п-ова, где преобладает песок со средним размером до 0.3 мм, тогда как сравнительно крутой профиль 2 сложен более крупным песком 0.4 мм.

При расчетах искусственного пляжа за основу были приняты параметры экстремального шторма [2], приведенные в табл. 1, где  $\bar{H}$  и  $\bar{T}$  – средние высота и период волн в открытом море,  $\eta$  – высота штормового нагона (с учетом пика прилива),  $h_B$  – глубина обрушения волн, ограничивающая расчетный профиль [4].

В качестве потенциального источника материала для пополнения пляжей рассматривается шельфовая зона в восточной части п-ова Икакос. Здесь имеются значительные запасы песка со средним размером частиц от 0.4 до 0.8 мм [5]. Соответственно расчеты пляжа проводились для указанного диапазона крупности песка.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

**Профиль 1.** В табл. 2 приведены показатели искусственного пляжа, рассчитанные для различной крупности песка  $d_g$  и различных значений  $X$ , определяющих проектируемую величину расширения пляжа на профиле 1, который относится к центральной части п-ова Икакос. Вид полученных профилей пляжа отражен на рис. 4.

Прежде всего, отметим, что использование песка 0.4 мм позволяет выдвинуть пляж не более, чем на 10 м. Дело в том, что профиль равновесия

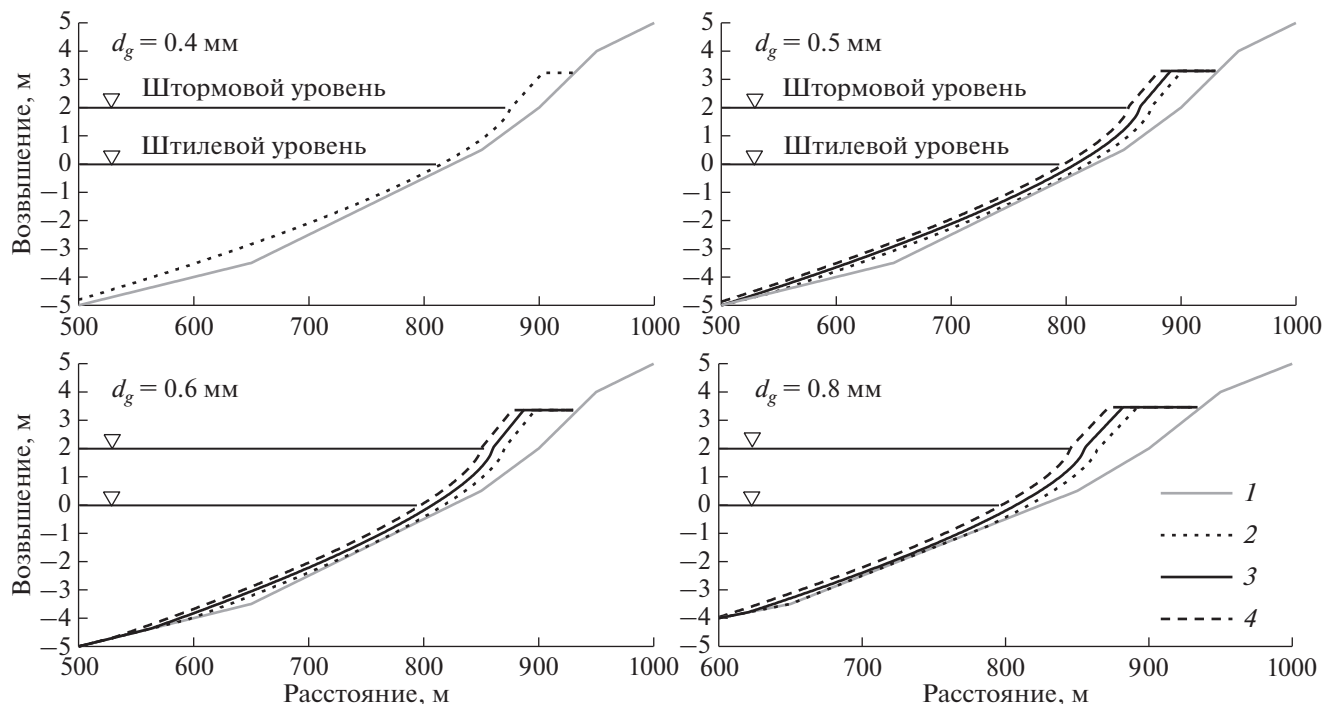


Рис. 4. Искусственный пляж для профиля 1: 1 – естественный профиль, 2, 3 и 4 – профили искусственного пляжа при выдвигении берега на 10, 20 и 30 м при различной крупности песка.

имеет определенную длину, которая должна уложиться между точкой обрушения волн и точкой максимального возвышения существующего пляжа. Чем мельче материал, тем длиннее профиль. В данном случае крупность 0.4 мм оказывается близка к нижнему пределу, и для существенного расширения пляжа требуется более грубый материал.

Как видно из табл. 2 и рис. 4, укрупнение песка приводит к росту возвышения  $Z_m$  и сокращению ширины пляжа  $l_{\text{beach}}$ , что обусловливается ростом уклона профиля равновесия и соответствующим увеличением высоты волнового заплеска. Однако эти изменения в целом незначительны.

В то же время требуемый объем материала  $V$  (как и длина бермы  $l_a$ ) значительно возрастает с увеличением планируемого расширения пляжа  $X$  и немного уменьшается с ростом крупности песка. Эти тенденции отражены на рис. 5.

**Профиль 2.** Напомним, что уклон профиля 2, характеризующего корневую часть п-ова Икакос, вдвое больше, чем уклон профиля 1 (рис. 3). Соответственно для строительства пляжа здесь требуется значительно более крупный материал, иначе равновесный профиль будет иметь слишком большую длину. Это обстоятельство иллюстрирует рис. 6. Видно, что даже для самого крупного имеющегося в наличии песка 0.8 мм расчет-

ный профиль оказывается слишком пологим и не укладывается в заданные пределы.

Путем подбора было установлено, что в данных условиях может быть использован только гравий или галька размером не менее 7 мм (соответствующий профиль также показан на рис. 6). Источников подобного материала в районе Варadero нет. А значит, строительство искусственного пляжа в рассматриваемом случае едва ли имеет смысл по экономическим соображениям.

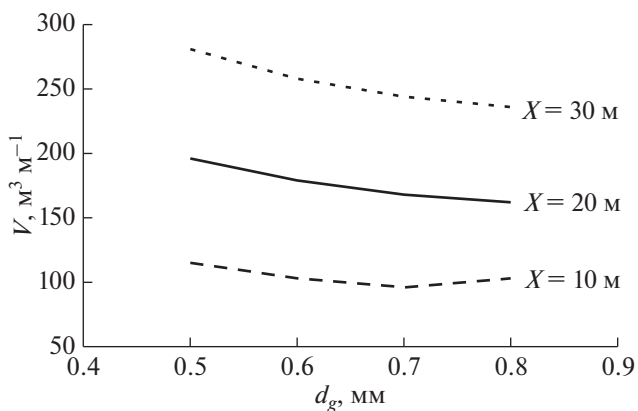


Рис. 5. Зависимость требуемого объема материала от его крупности при заданном выдвигении пляжа (профиль 1).



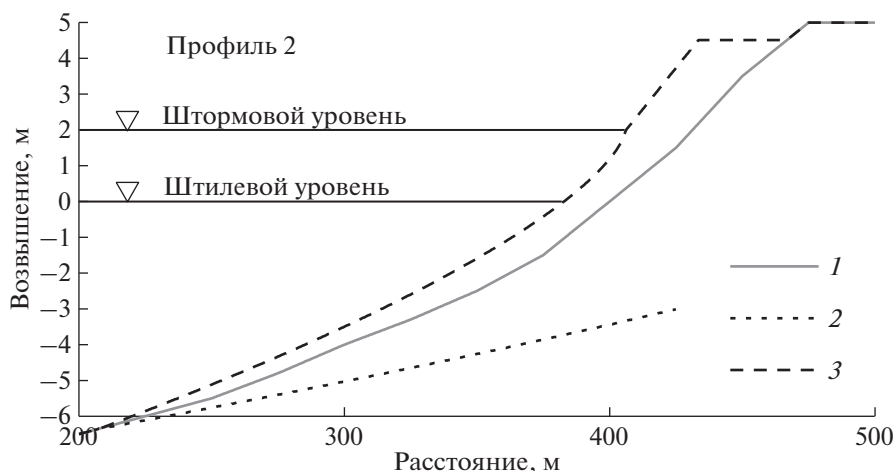


Рис. 6. Профиль 2: 1 – естественный профиль, 2 и 3 – профили искусственного пляжа при крупности материала 0.8 и 7 мм.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Искусственный пляж представляет собой возмущение берега с поперечным размером  $X$  и длиной вдоль берега  $Y$ . Вдольбереговые течения будут постепенно сглаживать это возмущение и выносить материал за его пределы. Согласно [6], отношение остаточного объема  $V(t)$  к первоначальному объему пляжа  $V_0$ , можно оценить по приближенной зависимости

$$\frac{V(t)}{V_0} = 1 - \frac{2\sqrt{Gt}}{\sqrt{\pi} Y}, \quad G = \frac{\hat{Q}}{z_a}, \quad (4)$$

где  $t$  – время, а  $G$  имеет смысл коэффициента диффузии. Величина  $\hat{Q}$  представляет удвоенную емкость вдольберегового потока наносов [4, 9] и в условиях Варадеро составляет порядка  $10^5 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$  [2]. Высота активного профиля берега  $z_a$  (от точки обрушения волн до верхней границы пляжа) имеет порядок 10 м. При таких значениях параметров

зависимость (4) принимает вид  $\frac{V(t)}{V_0} \approx 1 - 10^2 \frac{\sqrt{t}}{Y}$ .

Очевидно, чем длиннее пляж (больше  $Y$ ), тем меньше относительные потери материала. Так, при малом протяжении пляжа  $Y = 10^2 \text{ м}$  он будет размыт уже в первые годы после строительства, а при длине  $Y = 10^3 \text{ м}$  он сохранит более половины первоначального объема материала даже через 20 лет. Очевидно, срок службы пляжа может быть продлен периодическими подсыпками песка.

Помимо этого, объем пляжа будет уменьшаться за счет истирания песка и выноса его на глубину. Это сравнительно медленный процесс, и связанная с ним убыль материала должна быть заведомо меньше вдольбереговых потерь, определяемых величиной  $10^2 \frac{\sqrt{t}}{Y}$ . Удвоенная величина,  $2 \times 10^2 \frac{\sqrt{t}}{Y}$ ,

по-видимому, может рассматриваться как верхний предел суммарных потерь. При таких потерях объем пляжа длиной  $10^3 \text{ м}$  сократится наполовину уже через 6–7 лет. Однако подобный случай представляется маловероятным.

В практическом плане полученные результаты означают, что для строительства искусственного пляжа в центральной части п-ова Икакос подходит песок с крупностью больше 0.4 мм. Максимальное возвышение пляжа должно быть не меньше 3.3 м. При планируемом выдвигении пляжа на 10, 20 или 30 м, потребуется объем песка около 100, 180 или 250  $\text{м}^3 \text{ м}^{-1}$  при соответствующей ширине бермы от 30 до 65 м.

Что касается корневой части полуострова, то здесь для отсыпки пляжа нужен сравнительно крупный материал (размером не меньше 7 мм), источников которого в рассматриваемом районе нет. В этих условиях создание искусственного пляжа представляется экономически нецелесообразным. По-видимому, здесь следует применить иные способы берегозащиты.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 0149-2019-0005) и при частичной поддержке РФФИ (проект Куба\_т, грант № 18-55-34002).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авельо Суарес О., Ионин А.С., Медведев В.С. и др. Геоморфология и история развития п-ова Икакос (Куба). Островные шельфы тропической зоны океана. М.: Изд-во ИО АН СССР, 1975. Вып. 1. С. 99–113.
2. Дунаев Н.Н., Леонтьев И.О., Репкина Т.Ю., Herrera J.F. Геоэкологическая обстановка района международного курорта Варадеро (Куба) // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 50. С. 152–169.

3. Дунаев Н.Н., Фойо-Эррера Х. Геолого-геоморфологическое строение и неотектоника полуострова Икакос и его западного шельфа // *Океанология*. 1988. Т. 28. № 4. С. 591–595.
4. 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.
5. Медведев В.С., Хуанес Х.Л. Морфолитодинамические исследования в береговой зоне и на шельфе северного побережья Кубы // *Континентальные и островные шельфы. Рельеф и осадки*. М.: Наука, 1981. С. 229–251.
6. Dean R.G. Beach nourishment: theory and practice. World Scientific Inc. 2002. 399 p.
7. 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.
8. Juanes Marti J.L. La Erosión en las playas de Cuba. Alternativas para su control. Tesis de doctorado en Ciencias Geográficas. Universidad de La Habana, Facultad de Geografía. Habana. 1996. 101 p.
9. Leontyev I., Akivis T. An artificial beach as a means for sea coast protection from storm surges (by the example of the Eastern Gulf of Finland) // *Proc. of Int. Conf. "Managing risks to coastal regions and communities in changing world" (EMECs'11 – Sea Coasts XXVI)*. 2017. ISBN 978-5-369-00829-4. [https://www.google.com/url?q=https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.21610%2Fconferencearticle\\_58b4315f8fc73&sa=D&sntz=1&usq=AFQjCNGPEKTFBEreOx2JE-ApS5YELG6ahg](https://www.google.com/url?q=https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.21610%2Fconferencearticle_58b4315f8fc73&sa=D&sntz=1&usq=AFQjCNGPEKTFBEreOx2JE-ApS5YELG6ahg)
10. Santana J.R.H., González R.R. Playa de Varadero, península de Hicacos, Cuba: formación y evolución de su relieve y experiencias ambientales de su regeneración artificial // *Investigaciones Geográficas, Universidad Nacional Autónoma de México*. 2002. № 049. P. 43–56.
11. Электронный ресурс: JazzTour.ru>blog/articles/35253. Посещение 09.02.2020 г.

## On the Problem of Coast Protection of Varadero Resort (Cuba) with the Artificial Beach

N. N. Dunaev<sup>a, #</sup>, I. O. Leont'yev<sup>a, ##</sup>, J. L. J. Marti<sup>b, ###</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR), Habana, Cuba*

<sup>#</sup>*e-mail: dunaev@ocean.ru*

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

<sup>###</sup>*e-mail: juanes@ceniai.inf.cu*

Recent coastal dynamics of Varadero resort located on Hicacos Peninsula (northern Cuba coast) demonstrate the trend of progressive erosion and degradation of beach. In this paper, the approach to coastal protection based on creation of artificial beach which should withstand to extreme storm impact is suggested. Parameters of protecting beach composed of biogenic sand (most available material in the region of interest) are determined from the model [4, 9]. It is argued that for building the beach in the central part of Hicacos Peninsula the material coarser 0.4 mm can be used. Maximal elevation of beach should exceed 3.3 m. For expected coast advance 10, 20 or 30 m the sand volumes of about 100, 180 or 250 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> should be required. In the root part of Hicacos Peninsula where coastal slope is rather steep the construction of artificial beach is not practical from the economy viewpoint, and so another manner of coast protection should be selected.

**Keywords:** coast erosion, artificial beach, biogenic sand, equilibrium profile, modelling