

УДК 551.435.3

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ШТОРМОВЫХ РАЗМЫВОВ ПЕСЧАНОГО БЕРЕГА

© 2021 г. И. О. Леонтьев*

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

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

После доработки 09.09.2020 г.

Принята к публикации 30.09.2020 г.

Предложен критерий или индекс для оценки опасности штормовых размывов берега, основанный на сравнении фактического объема пляжа V_b с оптимальным значением V_{b^*} , при котором шторм с повторяемостью 1 раз в год не приводит к необратимым негативным последствиям. Уровень опасности размыва определяется в зависимости от разности величин V_b и V_{b^*} и достигает максимума (3 балла), когда фактический объем пляжа оказывается меньше половины оптимального значения (0 баллов отвечает случаю, когда $V_b > V_{b^*}$). Для расчета индекса размыва достаточно иметь репрезентативный профиль пляжа, а также данные о ветро-волновом режиме и среднем размере песка. Объектами для тестирования индекса послужили побережья Анапской пересыпи (Черное море) и южного сегмента Вислинской косы (Балтийское море). Индекс позволяет выявить уязвимые участки берега и одновременно характеризует объем дефицита наносов, что может быть использовано при планировании берегозащитных мероприятий.

Ключевые слова: размыв берега, штормовой нагон, волновой заплеск, объем пляжа, индекс размыва

DOI: 10.31857/S0030157421020118

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз уязвимости песчаных морских берегов по отношению к штормовым размывам весьма актуален, особенно в связи с возможным повышением относительного уровня моря, обусловленным тектоникой и изменениями климата. Известен подход к оценке устойчивости берега с помощью некоторого индекса, интегрирующего различные показатели природной среды. Так, индекс [12], включающий геолого-геоморфологическую обстановку, уклон берегового склона, изменения относительного уровня моря и береговой линии, значимую высоту волн и высоту прилива, позволил охарактеризовать уязвимость пляжей северо-восточного побережья Испании по 5-балльной шкале [14]. Индекс такого же рода [16], учитывающий возвышение и экспозицию берега, а также высоту волнового заплеска, применялся для оценки состояния бразильских пляжей [11]. Подход к оценке уязвимости берегов, развитый в работе [10], принимает во внимание, главным образом, особенности процессов трансформации волн в береговой зоне.

В настоящей работе в качестве индикаторов состояния песчаного берега предлагается использовать параметры надводной части пляжа, а именно: его возвышение, ширину и объем. Под

шириной пляжа понимается горизонтальное расстояние от уреза до вершины берегового вала, либо до подножья авантоны или клифа (рис. 1) в зависимости от типа берегового профиля. Хорошо известно, что относительно узкий пляж диссипирует лишь часть волновой энергии, остаток которой расходуется на размыв дюнного пояса или прилегающей суши. В то же время широкий пляж, как правило, свидетельствует о стабильном положении берега. Можно полагать, что при определенном соотношении ширины l_{b^*} и возвышения z_{b^*} пляжа, а значит, при его оптимальном объеме V_{b^*} , штормовой размыв не будет иметь необратимых последствий, т.е. берег сохранит динамическое равновесие и будет способен восстанавливаться после штормовых атак. Сравнение фактического объема пляжа с эталонным значением V_{b^*} может дать представление о текущем состоянии берега и его будущих изменениях.

Цель данной работы заключается, во-первых, в определении оптимальных параметров песчаного пляжа, отвечающих заданному шторму, и во-вторых, в выработке критерия или индекса, позволяющего оценить уровень опасности штормовых размывов для интересующего нас берега. Применение предложенного индекса иллюстри-

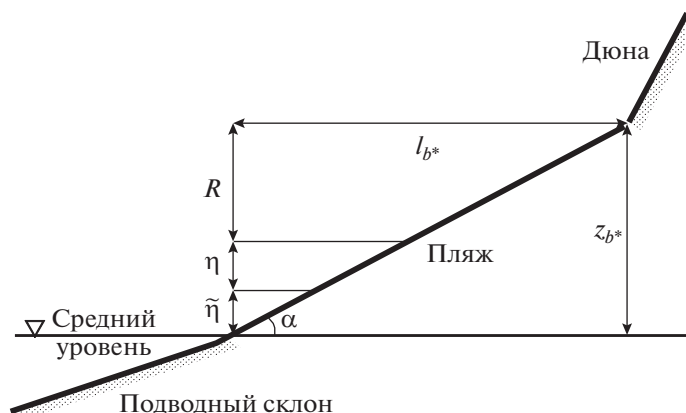


Рис. 1. Схема берегового склона. Обозначения в тексте.

руется на примере двух береговых участков Балтийского и Черного морей.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛЯЖА

Максимальное возвышение пляжа, как видно на рис. 1, складывается из высот волнового заплеска R , штормового нагона η , а также приливных и сезонных колебаний уровня $\tilde{\eta}$. Соответствующая ширина пляжа зависит от его уклона $\beta_* = \operatorname{tg}\alpha$, где α – средний угол наклона профиля, а объем на единицу длины берега ($\text{м}^3/\text{м}$) определяется произведением линейных размеров пляжа:

$$z_{b^*} = R + \eta + \tilde{\eta}, \quad l_{b^*} = z_{b^*}/\beta_*, \quad V_{b^*} = l_{b^*}z_{b^*}/2. \quad (1)$$

Высота заплеска на пологих песчаных берегах, подверженных воздействию штормовых волн, может быть оценена по зависимости [17]:

$$R = 0.043\sqrt{H_{s0}L_0}, \quad L_0 = \frac{g}{2\pi}T_p^2, \quad (2)$$

где H_{s0} , L_0 , и T_p – значимая высота, длина и период спектрального пика на глубокой воде.

Штормовой нагон η включает две основных составляющих: $\eta = \eta_w + \eta_a$. Первая из них – ветровой нагон η_w , который определяется из условия равновесия между касательным напряжением ветра τ_w и наклоном водной поверхности:

$$\frac{d\eta_w}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho g(h + \eta_w)}, \quad \tau_w = k_w \rho W^2, \quad (3)$$

где h и x – глубина и горизонтальное расстояние, ρ – плотность воды, g – ускорение силы тяжести, $k_w = 3 \times 10^{-6}$ ветровой коэффициент, W – скорость ветра. Уравнение (3) линеаризуется, и его решение представляется в виде трансцендентного соотношения, из которого путем подбора определяется $\eta_w(x)$ для заданного профиля глу-

бин на шельфе $h(x)$ [7]. Вторая составляющая нагона, $\eta_a = \Delta p_a/\rho g$, представляет статический подъем уровня за счет падения атмосферного давления Δp_a при прохождении циклона, сопровождающего шторм. Падение давления на n кПа ($1 \text{ кПа} \approx 7.5 \text{ мм ртутного столба}$) повышает уровень воды на $0.1n$ м и в типичном случае η_a характеризуется величиной $0.1\text{--}0.2$ м [6].

Уклон пляжа в состоянии равновесия, согласно [18], определяется зависимостью

$$\beta_* = 0.12 \left(\frac{T_p \sqrt{g d_g}}{H_{sB}} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

где d_g – средний размер частиц песка, H_{sB} – значимая высота волн в точке обрушения. Для относительно крутых штормовых волн величину H_{sB} в формуле (4) можно без большой погрешности заменить на H_{s0} [15], что упрощает вычисления.

Формула (4) предсказывает сравнительно слабую зависимость уклона от крупности песка ($\sim d_g^{1/4}$). Однако, по наблюдениям [2], размер твердых частиц решающим образом влияет на уклон пляжа. Приведенный в [2] график зависимости для минимального уклона можно аппроксимировать как

$$\beta_* = 0.237d_g^{3/2} - 0.010, \quad 0.2 < d_g < 0.8 \text{ мм}. \quad (5)$$

В дальнейшем будем использовать обе приведенные зависимости, сообразуясь с фактическими данными.

Таким образом, приведенные формулы определяют оптимальные параметры пляжа как функции характеристик прилива, ветра и волн, морфологии дна шельфа, а также крупности материала, слагающего пляж.

ИНДЕКС РАЗМЫВА

Очевидно, наибольший практический интерес представляют характеристики пляжа, отвечающие достаточно значимым штормовым событиям, например штормам с периодом повторяемости 1 год. Если фактический объем пляжа V_b меньше значения V_{b^*} , соответствующего такому шторму, то, по крайней мере, раз в год будет происходить размыв авантюны или прилегающей суши, чтобы восполнить дефицит материала пляжа. При заметных различиях объемов, когда $V_b < V_{b^*}$, высока вероятность прогрессирующего размыва и отступления берега. И наоборот, в случае $V_b > V_{b^*}$ запас материала пляжа может быть достаточным для сохранения динамического равновесия. Таким образом, в качестве индекса размыва берега можно использовать, например, такое соотношение:

$$I_e = \frac{V_b - V_{b^*}}{V_{b^*}}. \quad (6)$$

Принимая во внимание возможные ошибки при подсчете как теоретических, так и фактических объемов пляжей, имеет смысл выделить диапазон значений индекса $-0.1 \leq I_e \leq 0.1$, для которого однозначная оценка состояния берега затруднена вследствие малых различий V_b и V_{b^*} . Для берегов, попадающих в указанный диапазон I_e , вероятность размыва будем считать достаточно низкой. Положительные значения индекса $I_e > 0.1$ характеризуют состояние берега как устойчивое (размыв отсутствует), а отрицательные $I_e < -0.1$ — как уязвимое. Для числового выражения уровня опасности размыва удобно использовать 4-балльную шкалу в соответствии с выделенными градациями индекса, как показано в табл. 1. Высокий уровень опасности соответствует условиям, когда объем пляжа оказывается меньше половины необходимой величины.

В случаях средней и высокой опасности размыва величина I_e характеризует относительный объем дефицита наносов, что может быть использовано при планировании защиты отступающих берегов. Допустим, что дефицит наносов на пляже составляет $V_b - V_{b^*} = \Delta V$, а берег характеризуется абразионным клифом высотой h_{cl} , отступающим со скоростью c_{cl} . При этом доля пляжеобразующих фракций в материале клифа составляет $n_b \ll 1$, из которых на пляже остается только часть $k_b < 1$ (остальная часть уходит на подводный склон). Возникает вопрос, на какое расстояние X_{cl} и за какое время t_{cl} должен отступить клиф, чтобы дефицит был восполнен и берег достиг динамического равновесия? Представив объем пляжевого материала, поступившего из клифа, как

Таблица 1. Градации индекса размыва и соответствующие уровни опасности

Индекс размыва	Уровень опасности	Балл
$I_e > 0.1$	Нулевой	0
$-0.1 \leq I_e \leq 0.1$	Низкий	1
$-0.5 \leq I_e < -0.1$	Средний	2
$I_e < -0.5$	Высокий	3

$V_{cl} = k_b n_b h_{cl} X_{cl}$ и приравняв его величине ΔV , найдем

$$X_{cl} = \frac{\Delta V}{k_b n_b h_{cl}}, \quad t_{cl} = \frac{X_{cl}}{c_{cl}}. \quad (7)$$

Пусть, например, дефицит наносов равен $\Delta V = -20 \text{ м}^3/\text{м}$, а клиф высотой $h_{cl} = 5 \text{ м}$ с содержанием пляжеобразующего материала $n_b = 0.02$ отступает со скоростью $c_{cl} = -1 \text{ м/год}$, причем на пляже остается половина поступающих наносов ($k_b = 0.5$). Тогда, согласно (7), отступление берега прекратится при смещении клифа на расстояние $X_{cl} = -400 \text{ м}$, что потребует времени $t_{cl} = 400 \text{ лет}$. Следует иметь в виду, что по мере увеличения объема пляжа скорость отступления клифа должна замедляться, и фактическое время t_{cl} , скорее всего, будет больше расчетного.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕКСА РАЗМЫВА

Анапская пересыпь. В качестве одного из объектов для тестирования индекса I_e выбрана Анапская пересыпь, расположенная в северо-восточном секторе Черного моря между мысами Анапский и Железный Рог (рис. 2а). Песчаные пляжи здесь по большей части оканчиваются береговой дюной, а в районах Благовещенского останца и Железного Рога примыкают к клифу. Данные о летних профилях пляжей на различных участках пересыпи любезно предоставлены сотрудником Южного Отделения Института океанологии РАН к.г.н. В.В. Крыленко. Расположение профилей отражено на рис. 2а. Основываясь на данных наблюдений [5], характерный средний размер песка на пляже можно принять равным 0.35 мм. Наибольшее воздействие на Анапскую пересыпь оказывают западные и юго-западные шторма. Согласно справочнику [9], скорость ветра и волновые параметры для штормов с периодом повторяемости 1 год характеризуются следующими величинами: $W = 23.8 \text{ м/с}$, $H_{s0} = 4.7 \text{ м}$, $T_p = 8.6 \text{ с}$. Приливы практически отсутствуют, но отмечаются сезонные и межгодовые колебания уровня 0.1–0.2 м.

Высота ветрового нагона, рассчитанная по уравнению (3), оценивается как $\eta_w = 0.4 \text{ м}$. Эта

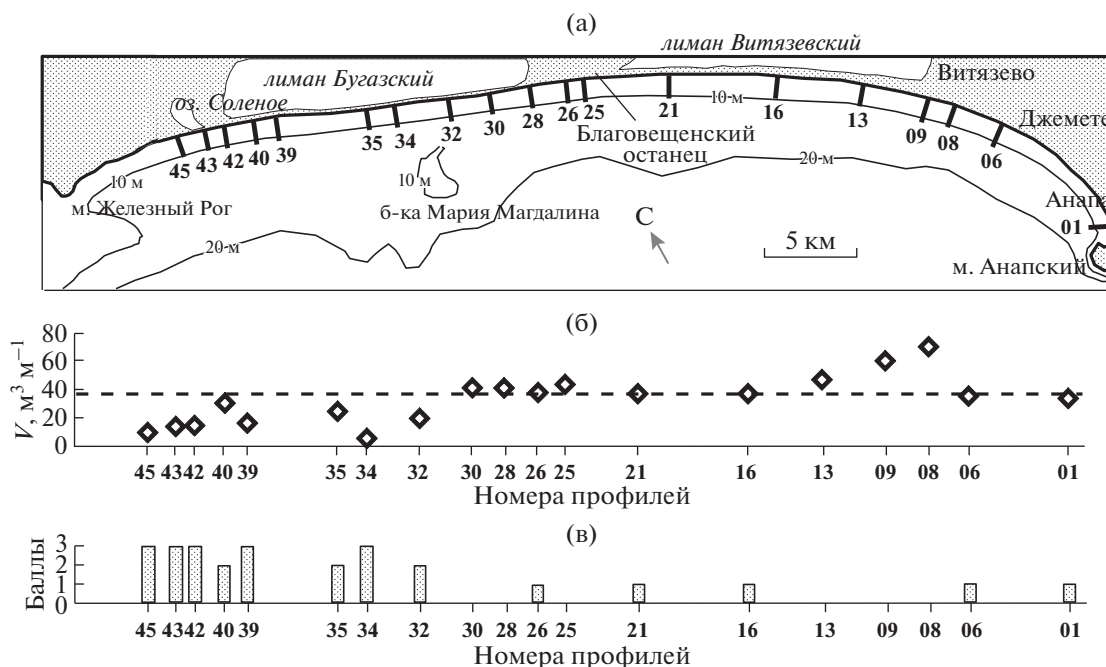


Рис. 2. (а) – Схема Анапской пересыпи и расположение промерных профилей (по [4]); (б) – объемы пляжа. Прерывистой линией отмечено расчетное значение, отвечающее шторму с годовой повторяемостью; (в) – распределение индекса размыва по протяжению берега (балл 3 соответствует высокому уровню опасности размыва).

величина отвечает юго-западному ветру, дующему над самой широкой частью анапского шельфа, где 100-метровая изобата проходит в 50–60 км от берега. Подъем уровня при прохождении штормового циклона с учетом приведенной ранее оценки [6] охарактеризуем величиной $\eta_a = 0.15$ м. Тогда штормовой нагон $\eta = 0.55$ м и амплитуда сезонных колебаний уровня $\tilde{\eta} = 0.15$ м в сумме дадут 0.7 м. Высота волнового заплеска в соответствии с (2) равна $R = 1.0$ м. Следовательно, оптимальная высота пляжа $z_{b*} = 1.7$ м.

Значения уклона пляжа, подсчитанные по формулам (4) и (5), в данном случае совпадают: $\beta_* = 0.039$. Таким образом, оптимальные ширина и объем пляжа определяются величинами $l_{b*} = 43.6$ м и $V_{b*} = 37.1 \text{ м}^3/\text{м}$.

Фактические параметры пляжей оценивались на основе профилей, часть которых приведена на рис. 3. Условная граница пляжа обозначена прерывистой вертикальной линией в точке возрастания уклона у подножья авантюны или клифа. Для профилей 21 и 43 граница определена по вершине берегового вала (авантюны или клиф здесь отсутствуют). Клиф отмечается на профилях 26, 28 и 45. Параметры пляжей и полученные индексы размыва приведены в табл. 2. Изменения объема пляжа и индекса размыва по протяжению берега показаны на рис. 2б, в соответственно.

Вислинская коса. Вторым объектом для применения индекса размыва послужил морской берег Вислинской косы, точнее ее южного (польского) сегмента (рис. 4а). Летние профили пляжа, зафиксированные промерами 2007 г. [13], представлены на рис. 5. Пляжи, сложенные среднезернистым песком с характерным размером 0.3–0.5 мм, примыкают к авантюне. Наибольшее воздействие на берега косы оказывают северные и северо-западные волнения. Скорость ветра и волновые параметры для штормов с периодом повторяемости 1 год характеризуются следующими величинами: $W = 20$ м/с, $H_{s0} = 5.6$ м, $T_p = 9.5$ с [9]. Приливы практически незаметны.

Штормовые нагоны ежегодно достигают высоты 0.5–0.8 м [1]. С учетом возможных сезонных колебаний максимальный годовой уровень $\eta + \tilde{\eta}$, вероятно, близок к 1 м. Высота волнового заплеска в соответствии с формулой (2) составляет $R = 1.2$ м. Таким образом, возвышение пляжа оценивается как $z_{b*} = 2.2$ м.

Что касается уклона пляжа, то для среднего размера песка $d_g \approx 0.4$ мм формула (4) дает значение около 0.04, а формула (5) – 0.05. Нетрудно убедиться, что вторая величина в большей мере соответствует фактическим уклонам профилей, показанных на рис. 5, и потому имеет смысл принять $\beta_* = 0.05$. Тогда оптимальные ширина и объ-

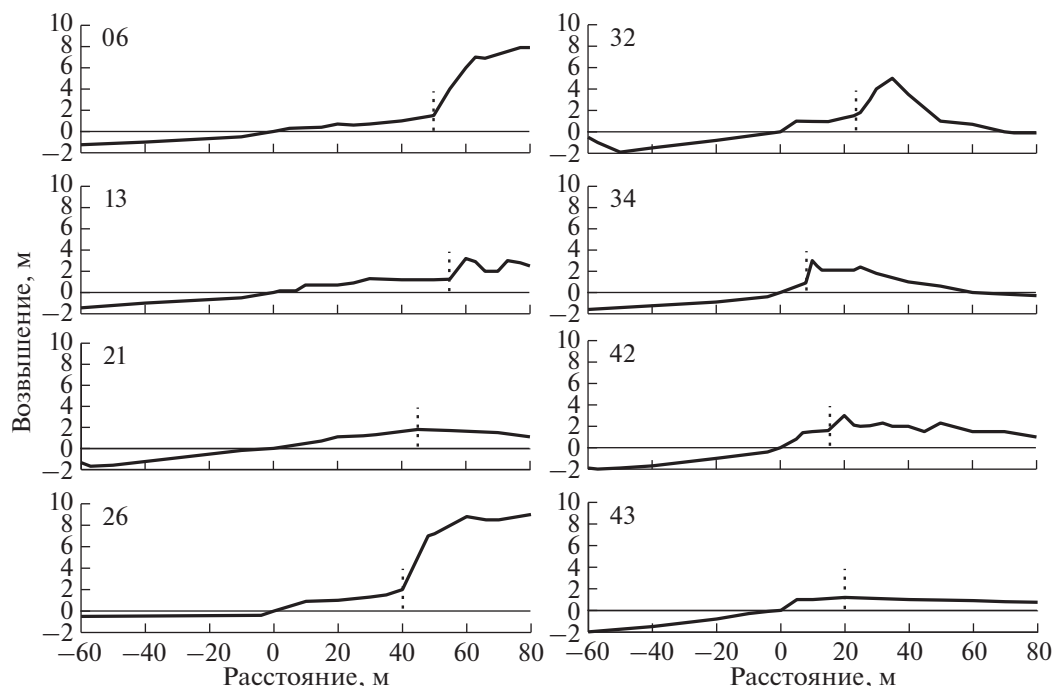


Рис. 3. Характерные профили пляжа Анапской пересыпи. Прерывистые вертикальные линии маркируют условную границу пляжа. Положение профилей отражено на рис. 2а.

ем пляжа могут быть охарактеризованы значениями $l_{b*} = 44.0$ м и $V_{b*} = 48.4$ м³/м.

Фактические параметры пляжей и подсчитанные значения индекса размыва приведены в табл. 3. Объемы пляжа и индексы размыва в баллах на различных профилях показаны на рис. 4б, в.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анапская пересыпь. Наблюдаемые возвышения анапских пляжей, как видно из табл. 2, в общем, близки к аналитической оценке 1.7 м (за некоторыми исключениями), т.е. фиксируемая высота пляжа действительно коррелирует с параметрами наиболее значимого штормового события за годовой период.

Что касается ширины пляжей, то в восточной части пересыпи она, в основном, близка к эталонной величине 43.6 м или превышает ее. На рис. 2б, в видно, что объемы пляжа в восточной части пересыпи по большей части достаточны, чтобы выдержать шторма с годовой повторяемостью, и уровень опасности размыва нигде не превышает 1 балла. Локальные размывы возможны в районе Анапского пляжа и на некоторых участках побережья Витязевского лимана.

Однако к западу от Благовещенского останца опасность размыва существенно возрастает, достигая 3 баллов на пересыпи Бугазского лимана и в районе оз. Соленого. Высота пляжей, согласно

табл. 2, в основном такая же, как в восточной части пересыпи (за исключением участков профилей 34 и 43), однако их ширина и объем заметно уменьшаются (рис. 2б). Приток наносов с подводного склона здесь ограничен вследствие их

Таблица 2. Параметры пляжей и индекс размыва берегов Анапской пересыпи

№ профиля	z_b , м	l_b , м	V_b , м ³ /м	I_e	Балл
01	1.7	40	34	-0.08	1
06	1.5	50	38	0.02	1
08	2.0	70	70	0.89	0
09	1.5	110	60	0.62	0
13	1.2	55	48	0.29	0
16	1.7	40	38	0.02	1
21	1.7	45	38	0.02	1
25	1.7	45	45	0.21	0
26	2.0	40	40	0.08	1
28	2.0	32	42	0.13	0
30	1.7	35	42	0.13	0
32	1.5	23	20	-0.46	2
34	0.9	9	5	-0.89	3
35	1.7	26	26	-0.30	2
39	1.5	16	18	-0.51	3
40	1.8	23	32	-0.14	2
42	1.6	15	15	-0.60	3
43	1.2	20	15	-0.60	3
45	2.0	10	10	-0.73	3

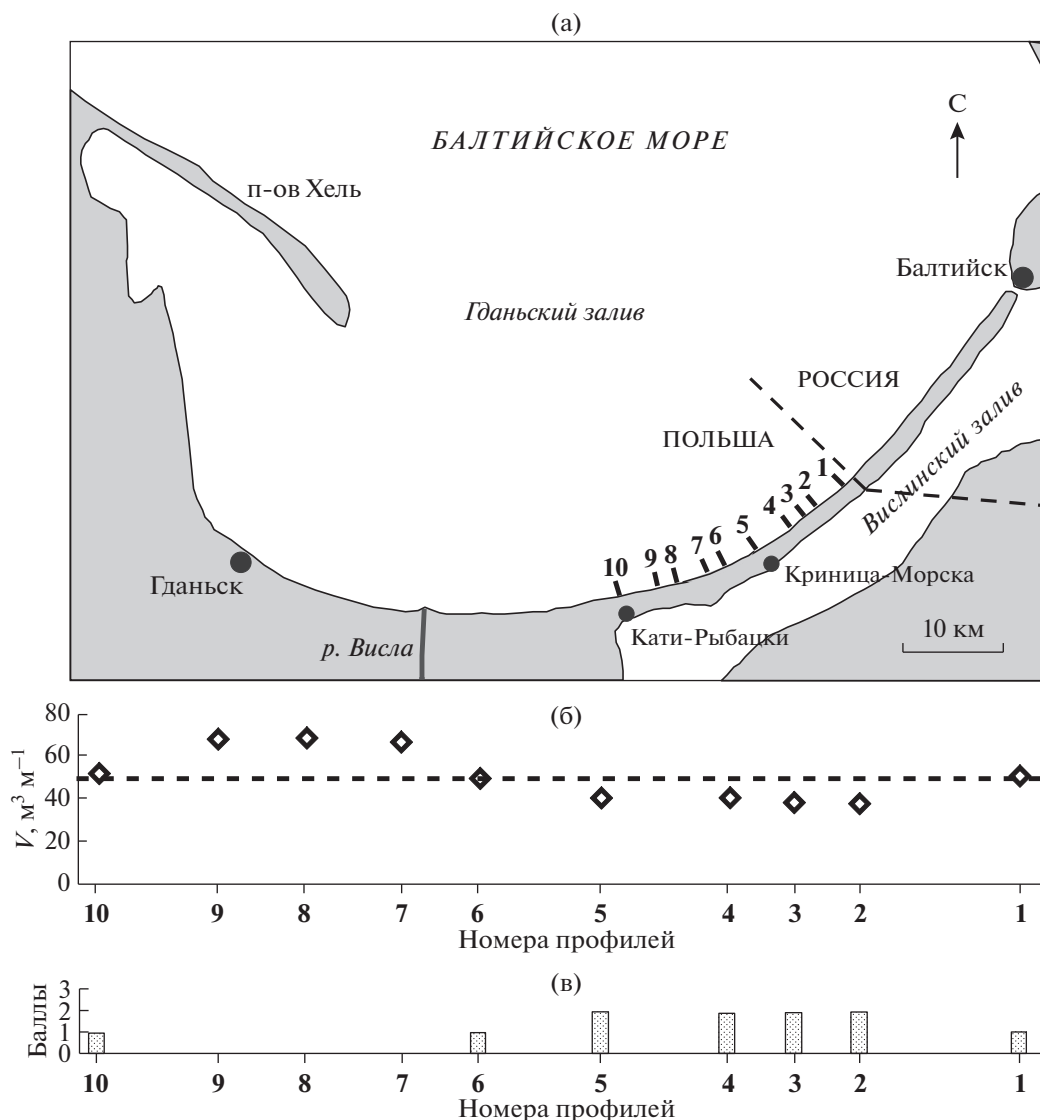


Рис. 4. (а) – Схема Вислинской косы и расположение промерных профилей (по [13]); (б) – объемы пляжа. Прерывистой линией отмечено расчетное значение, отвечающее шторму с годовой повторяемостью; (в) – распределение индекса размыва по протяжению берега.

дефицита [3]. Поступление материала за счет размыва авандюны или клифа также оказывается недостаточным, чтобы поддержать достаточный объем пляжа.

Следует обратить внимание на профили 34 и 43, где отмечается высший уровень опасности размыва (рис. 2в). На профиле 34 объем пляжа на порядок меньше необходимого (табл. 2, рис. 2б), причем ширина всей пересыпи всего около 60 м, а на профиле 43 высота берега не превышает 1.2 м (рис. 3). На этих участках вполне реальна угроза прорыва в теле пересыпи при экстремальных штормах. Очевидно, требуется принятие берегозащитных мер, направленных на пополнение пляжей.

Таблица 3. Параметры пляжей и индекс размыва берегов южной части Вислинской косы

№ профиля	$z_b, \text{м}$	$l_b, \text{м}$	$V_b, \text{м}^3/\text{м}$	I_e	Балл
1	2.5	40	50.0	0.03	1
2	2.5	30	37.5	-0.23	2
3	2.5	30	37.5	-0.23	2
4	2.5	32	40.0	-0.17	2
5	2.3	35	40.2	-0.17	2
6	2.5	40	50.0	0.03	1
7	3.0	45	67.5	0.39	0
8	2.5	55	68.8	0.42	0
9	2.5	55	68.8	0.42	0
10	2.5	42	52.5	0.08	1

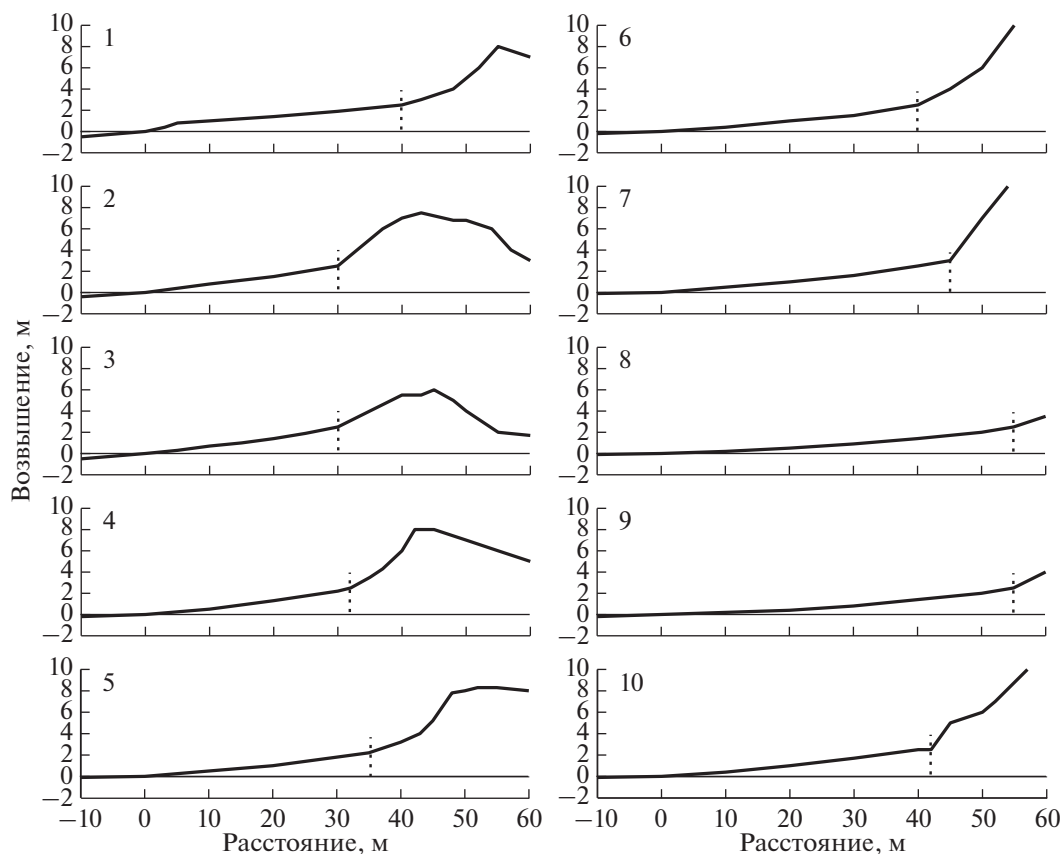


Рис. 5. Профили пляжа Вислинской косы (по [13]). Прерывистые вертикальные линии маркируют условную границу пляжа. Положение профилей отражено на рис. 4а.

Отступление берегов западной части Анапской пересыпи отчасти обусловлено тектоническим опусканием прибрежной суши и соответствующим подъемом относительного уровня моря [8]. В условиях достаточного количества наносов берег может отступать без изменения морфологии профиля. В этом случае индекс размыва будет оставаться положительным или близким к нулю, фиксируя нулевой или низкий уровень опасности размыва. Однако в случае дефицита пляжеобразующего материала, характерного для западной части Анапской пересыпи, повышение уровня приводит к сокращению пляжа, а значит, косвенно влияет на индекс I_e , который смещается в сторону отрицательных значений, отвечающих более высокому уровню опасности размыва.

Вислинская коса. Из табл. 3 следует, что возвышение пляжей косы несколько больше расчетного (2.2 м), а их ширина колеблется около эталонного значения (44.0 м). В восточной части рассматриваемого сегмента косы объемы пляжей на некоторых участках примерно на 20% ниже оптимального значения (рис. 4б). Разница не слишком велика, и опасность размыва авантюны средняя (2 балла, рис. 4в). В западной части побере-

жья объемы пляжей всюду больше эталонной величины (иногда на 40%) и соответственно опасность размыва здесь нулевая или низкая (не больше 1 балла).

Таким образом, опасность размыва нигде не достигает высокого уровня (рис. 4в). По сравнению с Анапской пересыпью, берега южного сегмента Вислинской косы находятся в более устойчивом состоянии. Это обуславливается значительными запасами пляжеобразующего материала, которые поддерживаются притоком из расположенного неподалеку устья р. Висла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная идея предложенного подхода к оценке уязвимости берегов к штормовым размывам заключается в сравнении фактического объема надводного пляжа V_b с некоторым эталонным значением V_{b^*} , при котором воздействие самого сильного шторма в году не вызывает необратимых потерь материала. Для оценки V_b достаточно иметь репрезентативный профиль надводной части берегового склона, а величина V_{b^*} определяется на основе минимального набора данных о вет-

ро-волновом режиме и среднем размере песка на пляже. Введенный индекс размыва I_e представляет разность объемов $V_b - V_{b^*}$, отнесенную к оптимальному значению V_{b^*} , и в зависимости от знака и величины характеризует уровень опасности необратимых штормовых размывов от нулевого до высокого по 4-балльной шкале. В случаях опасности размыва величина I_e служит показателем дефицита наносов, что может быть использовано при планировании берегозащитных мероприятий.

Объектами для тестирования индекса I_e послужили побережья Анапской пересыпи и южного сегмента Вислинской косы, обеспеченные всеми необходимыми данными для расчетов. Полученное распределение I_e по протяжению берега показывает, что уровень опасности размыва в западной части пересыпи существенно выше, чем в восточной. Это согласуется с наблюдениями [4] и обуславливается как общим дефицитом наносов, так и относительным повышением уровня моря вследствие тектонического погружения суши.

Берега Вислинской косы менее уязвимы, так как не испытывают недостатка наносов, и опасность размыва нигде не достигает высокого уровня. При этих условиях фиксируемый объем пляжа оказывается того же порядка, что и расчетное оптимальное значение, отвечающее шторму с годовой повторяемостью (рис. 4б). Следует отметить, что такой объем пляжа недостаточен, чтобы противостоять более редким экстремальным штормам, которые, очевидно, будут вызывать размыв. Однако при наличии запаса материала берег может восстанавливаться в промежутках между такими штормами и в длительной перспективе сохранять динамическое равновесие.

В заключение отметим, что поведение берегов контролируется не только природными процессами, но и антропогенным воздействием, которое сказывается на состоянии пляжа и, в конечном счете, также отражается на величине индекса размыва. Последний, как было показано, обладает достаточной чувствительностью для выявления проблемных участков на исследуемых берегах.

Благодарности. Автор благодарен сотруднику Южного Отделения Института океанологии РАН к.г.н. В.В. Крыленко за предоставленные данные о береговых профилях Анапской пересыпи.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2019-0005) при частичной поддержке РФФИ (гранты №№ 18-55-34002 Куба_т и 18-05-00741).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баринова Г.М.* Калининградская область: климат. Калининград: Янтар. сказ, 2002. 194 с.

2. *Бэском В.* Волны и пляжи. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 280 с.
3. *Косьян Р.Д., Крыленко В.В.* Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование. М.: Научный мир, 2014. 256 с.
4. *Крыленко В.В.* Новые данные по динамике морского берега Анапской пересыпи // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 5. С. 821–828.
5. *Крыленко В.В., Косьян Р.Д., Кочергин А.Д.* Закономерности формирования гранулометрического состава донных и пляжевых отложений Анапской пересыпи // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 6. С. 1123–1134.
6. *Ланно Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. 432 с.
7. *Леонтьев И.О.* Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
8. *Леонтьев И.О., Акивис Т.М.* Моделирование динамики берегов Анапской пересыпи // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 2. С. 315–322.
9. Российский морской регистр судоходства. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Под ред. Лопатухина Л.И. и др. СПб.: Гидрометеиздат, 2006. 452 с.
10. *Сапрыкина Я.В., Кузнецов С.Ю., Штремель М.Н., Сундар В.* Метод оценки уязвимости береговой зоны под воздействием волнения на примере южного побережья полуострова Индостан // *Процессы в геосредах*. 2015. № 3. С. 76–87.
11. *Andrade T.S., Sousa P.H.G.O., Siegle E.* Vulnerability to beach erosion based on coastal process approach // *Applied Geography*. 2019. V. 102. P. 12–19.
12. *Gornitz V.* Global coastal hazards from future sea level rise // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1991. V. 89. P. 379–398.
13. *Kobelyanskaya J.* The yearly morphodynamic changes of the Polish coastal zone of the Vistula Spit // *Динамика прибрежной зоны бесприливных морей. Материалы международной конференции (школа-семинар)*. Балтийск (Калининградская обл.), 2008. С. 56–58.
14. *Koroglu A., Ranasinghe R., Jimenez J.A., Dastgheib A.* Comparison of coast vulnerability index applications for Barcelona Province // *Ocean and Coastal Management*. 2019. V. 178. P. 1–13.
15. *Larson M., Kraus N.C.* SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Tech. Rep. CERC-89-9. 1989. US Army Eng. Waterw. Exp. Station. Coastal Eng. Res. Center.
16. *Sousa P.H.G.O., Siegle E., Tessler M.G.* Vulnerability assessment of Massaguaçu beach (SE Brazil) // *Ocean and Coastal Management*. 2013. V. 77. P. 24–30.
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* / Lathan V.C., Trenhail A.S. (eds.). Amsterdam: Elsevier, 1989. P. 159–213.

Estimating Vulnerability of Sandy Coast to the Storm-Induced Erosion

I. O. Leont'yev[#]

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

[#]*e-mail: igor.leontiev@gmail.com*

Criterion or index to assess the hazard of storm-induced coastal erosion is suggested. It is based on comparison of actual beach volume V_b and its optimal value V_{b^*} which is sufficient to avoid irreversible beach changes due to most severe storm attack over the year. Level of erosion hazard is determined taking into account the difference of V_b and V_{b^*} and reaches the maximum (3 points) when the actual beach volume becomes less than a half of optimal value (0 point responds to case of $V_b > V_{b^*}$). To calculate the erosion index a representative beach profile is needed as well as the data on mean sand size and a wind/wave regime. Erosion index is tested on coasts of Anapa bay-bar (Black Sea) and southern part of Vistula Spit (Baltic Sea). The index allows distinguish vulnerable sections of coast and at the same time reflects the sediment deficit volume what could be used in shore protection design.

Keywords: coastal erosion, storm surge, wave run-up, beach volume, erosion index