

УДК 551.435.3

О ВОЗДЕЙСТВИИ СИСТЕМЫ БУН НА ПЕСЧАНЫЙ БЕРЕГ

© 2020 г. И. О. Леонтьев¹, *, Т. М. Аквис¹, **¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

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

**e-mail: akivis@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

После доработки 24.06.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Предложена модель, объясняющая аккумуляцию наносов в системе бун с позиций закона сохранения массы. Осаждение материала в межбунных отсеках связывается с градиентом вдольберегового потока наносов, проходящего через поле бун. Важным параметром модели является протяженность зоны влияния сооружения L . Сделан вывод о том, что скорость аккумуляции максимальна, когда расстояние между бунами близко к L , а при его увеличении до $2L$ накопление материала прекращается. Определены оптимальные соотношения между шагом системы бун, их длиной и шириной потока наносов. Полученные зависимости дают возможность осуществлять оперативный прогноз объема аккумуляции и расстояния, на которое выдвинется пляж в течение заданного времени (от нескольких часов до десятков лет). Примеры расчетов показывают, как управлять параметрами системы бун, чтобы достичь нужных результатов и уменьшить нежелательные последствия. Расчеты удовлетворительно согласуются с опубликованными данными наблюдений.

Ключевые слова: система бун, песчаный пляж, вдольбереговой расход наносов, аккумуляция, низовой размыв

DOI: 10.31857/S0030157420030041

ВВЕДЕНИЕ

Система бун представляет собой ряд примыкающих к берегу линейных сооружений, отстоящих друг от друга на определенное расстояние. Применение бун для защиты морских берегов имеет давнюю историю, охарактеризованную, например, в работе [7]. Однако до сих пор нет устоявшегося мнения о том, насколько целесообразно использование подобных сооружений в тех или иных условиях. Некоторые специалисты акцентируют внимание на негативном влиянии бун на прилегающие участки берега, где возникает низовой размыв. Тем не менее, сооружения данного вида продолжают строиться, и известно множество примеров их успешной работы в плане расширения пляжей и укрепления берегов [6, 7, 11, 14–16]. Накопленный опыт ясно свидетельствует о том, что применение бун имеет смысл только при наличии достаточно заметного вдольберегового транспорта наносов, создаваемого волнами и сопутствующими течениями.

Ожидаемый эффект бун состоит в том, что они перехватывают часть вдольберегового потока, и материал, задержанный в межбунных отсеках, наращивает пляж (рис. 1). Хотя идея достаточно

проста, ее реализация на практике не всегда приводит к желаемым результатам. Последствия зависят как от региональных условий, так и от параметров сооружений, включая их длину и шаг.

В связи с планированием использования бун для берегозащиты возникает ряд вопросов, например, как оценить годовой объем аккумуляции при заданных характеристиках бун, или при какой длине сооружений и при каком шаге системы можно обеспечить оптимальную скорость нарастания ширины пляжа? Попытки ответить на эти вопросы опираются, главным образом, на эмпирические аргументы [8, 11].

В последние десятилетия для расчетов используются также численные модели морфодинамики [12, 13], которые способны детально воспроизвести те или иные сценарии волновых воздействий при наличии береговых сооружений, но при этом подразумевают значительные затраты времени на подготовку данных и расчеты. Применение таких моделей целесообразно в тех случаях, когда уже сделан определенный выбор в пользу того или иного проекта. Однако на предварительной стадии, когда требуется приближенно оценить и сравнить различные варианты проекта, существенную

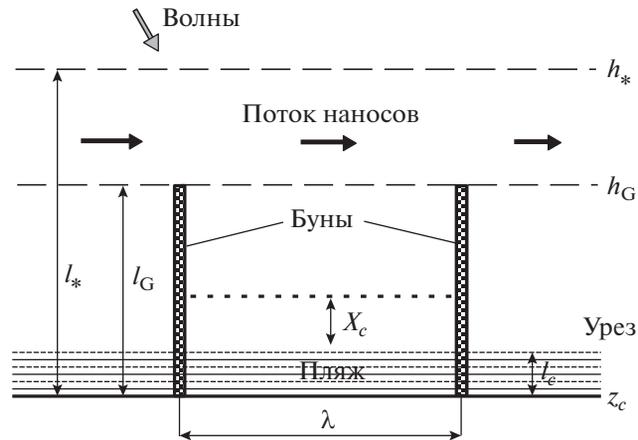


Рис. 1. Схема берега и системы бун. l_* — ширина потока наносов (активной области профиля), h_* — глубина замыкания, l_G — длина бун, h_G — глубина у головной части буны, l_c и z_c — ширина и возвышение пляжа, λ — расстояние между бунами или шаг системы, X_c — выдвигание береговой линии в результате работы бун.

помощь могут оказать более простые модели, отражающие суть процессов с меньшей детальностью, но позволяющие значительно сократить время на получение необходимой информации.

Вариант подобной модели представлен в настоящей работе. Аккумулирующий эффект системы бун объясняется с позиций закона сохранения массы. Результаты дают наглядное представление о том, как работает данная система при тех или иных условиях, и какие следствия может вызвать изменение ее параметров. Полученные зависимости дают возможность осуществлять оперативный прогноз объема аккумуляции и расстояния, на которое может выдвинуться пляж за определенный период времени. Также обсуждаются рекомендации в отношении выбора оптимальных параметров системы. Для верификации модели использованы опубликованные данные.

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИ

Исходным пунктом служит традиционное допущение о том, что изменения контура берега связаны, главным образом, с изменениями вдольберегового потока наносов, создаваемого волнами, а профиль дна близок к равновесию и может перемещаться вслед за контуром без заметных изменений формы.

Рассмотрим наиболее типичную ситуацию, когда длина бун l_G меньше ширины вдольберегового потока наносов l_* , и часть материала может проходить с внешней стороны сооружений (рис. 1). Также введем постулат, согласно которому, влияние преграды на поток наносов ограничивается определенным расстоянием Λ , как с наветрен-

ной, так и подветренной сторон сооружения (рис. 2).

Если шаг системы λ достаточно велик и удовлетворяет условию $\lambda \geq 2\Lambda$, то отдельные буны практически не влияют друг на друга и могут рассматриваться как независимые преграды для продольного перемещения наносов (рис. 2а). Перед преградой поток разгружается, а ниже по течению насыщается и восстанавливается до первоначального значения Q_0 . Аккумуляция с наветренной стороны препятствия вызывает выдвигание берега, а дефицит материала с подветренной стороны обуславливает отступление береговой линии. Для всех последующих элементов системы бун картина повторяется. Береговая линия приобретает волнообразный рисунок, однако ее среднее положение не изменяется, поскольку аккумуляция и размыв в целом компенсируют друг друга (рис. 2а).

Далее будет показано, что система бун способна накапливать материал только тогда, когда ее шаг λ меньше 2Λ (рис. 2б). Пусть в области, расположенной выше по течению, действующее волнение создает вдольбереговой расход наносов Q_0 . Первая буна (G_1) перехватывает его часть b_1Q_0 , и на ее створе продольный расход уменьшается до значения $Q_0 - b_1Q_0$. Величина b_1Q_0 , очевидно, эквивалентна скорости аккумуляции A_{c0} на участке перед первой буной: $A_{c0} = b_1Q_0$.

Ниже по течению расход возрастает по мере удаления от препятствия, и если бы расстояние λ_1 до следующей буны было 2Λ , то увеличение составило бы b_1Q_0 и поток восстановился бы до первоначального значения Q_0 (рис. 2а). Однако при меньших λ_1 увеличение может составить лишь

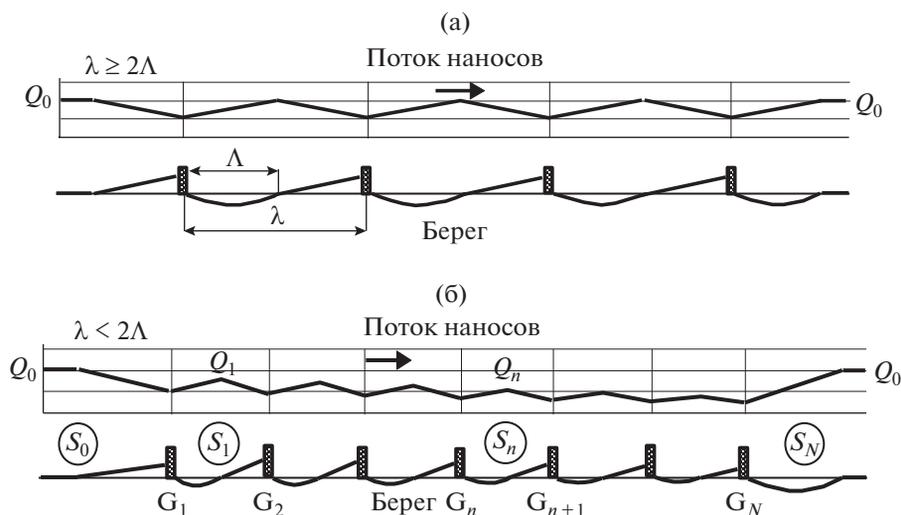


Рис. 2. Изменения потока наносов и контура берега при относительно большом (а) и относительно малом (б) расстоянии между бунами λ . Масштабом служит протяженность зоны влияния сооружения Λ .

часть $K_1 b_1 Q_0$, где $K_1 < 1$ и очевидно, зависит от λ_1 . Таким образом, максимальный расход наносов Q_1 для первого межбунного отсека S_1 должен быть равен

$$Q_1 = Q_0 - b_1 Q_0 + K_1 b_1 Q_0 = [1 - (1 - K_1) b_1] Q_0.$$

В области восстановления потока с подветренной стороны первой буны G_1 (рис. 2б) будет иметь место размыв со скоростью $K_1 b_1 Q_0$. В то же время в зоне разгрузки потока у наветренной стороны второй буны (G_2) наносы будут накапливаются со скоростью $b_2 Q_1$. Следовательно, результирующая аккумуляция в первом межбунном отсеке S_1 определится как

$$Ac_1 = b_2 Q_1 - K_1 b_1 Q_0 = [b_2 (1 - b_1) - b_1 (1 - b_2) K_1] Q_0.$$

Аналогичным путем найдем скорость аккумуляции в следующем отсеке (S_2):

$$Q_2 = [1 - (1 - K_2) b_2] Q_1, \\ Ac_2 = [b_3 (1 - b_2) - b_2 (1 - b_3) K_2] Q_1,$$

и в результате приходим к соотношениям, определяющим расходы наносов и аккумуляцию в каждом n -ном межбунном отсеке (S_n):

$$Q_n = [1 - (1 - K_n) b_n] Q_{n-1}, \quad (1)$$

$$Ac_n = [b_{n+1} (1 - b_n) - b_n (1 - b_{n+1}) K_n] Q_{n-1}, \quad (2) \\ n = 1, 2, 3, \dots, N - 1,$$

где N – число бун в системе (число межбунных отсеков равно $N - 1$). Очевидно, расход наносов уменьшается вниз по течению, аккумуляция мак-

симальна в первом межбунном отсеке, а далее снижается (рис. 2б).

Последняя буна в системе (с номером N) задерживает часть расхода наносов $b_N Q_{N-1}$, и на ее створе расход составляет $Q_{N-1} - b_N Q_{N-1} = (1 - b_N) Q_{N-1}$. Ниже по течению расход постепенно восстанавливается до первоначального значения Q_0 (рис. 2б). Разность указанных расходов эквивалентна скорости низового размыва Er_N :

$$Er_N = Q_0 - (1 - b_N) Q_{N-1}. \quad (3)$$

Мы рассмотрели ситуацию, когда поток наносов направлен слева направо при взгляде с берега (рис. 1 и 2). При подходе волн справа от береговой нормали, направление потока меняется на противоположное, и его начальное значение Q_N имеет тот же смысл, что Q_0 . На участке справа от буны с номером N материал теперь аккумулируется со скоростью Ac_N , а низовой размыв со скоростью Er_0 фиксируется ниже первой буны. Нетрудно убедиться, что данная ситуация может быть описана теми же зависимостями (1)–(3) при некоторой их модификации.

Представляя найденные зависимости для скоростей аккумуляции (Ac) и размыва (Er) как функции расходов наносов на входе в систему бун (Q_0 и Q_N), приходим к соотношениям:

$$Ac_0 = b_1 Q_0, \quad Ac_N = b_N Q_N. \quad (4)$$

$$Ac_n = a_n \prod_1^n c_n Q_0, \quad Ac'_n = a'_n \prod_1^{N-n} c'_n Q_N, \quad (5) \\ n = 1, 2, 3, \dots, N - 1,$$

$$\begin{aligned} a_n &= b_{n+1}(1 - b_n) - b_n(1 - b_{n+1})K_n, \\ c_n &= 1 - (1 - K_n)b_n, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a'_n &= b_n(1 - b_{n+1}) - b_{n+1}(1 - b_n)K_n, \\ c'_n &= 1 - (1 - K_n)b_{n+1}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Er_N &= \left[1 - (1 - b_N) \prod_1^{N-1} c_n \right] Q_0, \\ Er_0 &= \left[1 - (1 - b_1) \prod_1^{N-1} c'_n \right] Q_N, \end{aligned} \quad (8)$$

где величины, обозначенные штрихом, отвечают потоку наносов, направленному справа налево.

В частном случае, когда каждая бунa в системе характеризуется одной и той же величиной $b = \text{const}$, а шаг системы постоянен ($\lambda = \text{const}$, $K = \text{const}$), приведенные выше зависимости упрощаются:

$$Ac_0 = bQ_0, \quad Ac_N = bQ_N, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Ac_n &= ac^n Q_0, \quad Ac'_n = ac^{N-n} Q_N, \\ n &= 1, 2, 3, \dots, N - 1, \end{aligned} \quad (10)$$

$$a = b(1 - b)(1 - K), \quad c = 1 - (1 - K)b, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Er_N &= [1 - (1 - b)c^{N-1}]Q_0, \\ Er_0 &= [1 - (1 - b)c^{N-1}]Q_N. \end{aligned} \quad (12)$$

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Определим параметры модели b , K , Λ , Q_0 и h_* . Величина b , представляющая долю расхода наносов, задержанную бунной, зависит от отношения глубин у ее конца h_G и на границе вдольберегового потока h_* (рис. 1), и с учетом проницаемости сооружения ε_p оценивается как [5, 12]:

$$b = (1 - \varepsilon_p)(h_G/h_*), \quad h_G/h_* \leq 1 \quad (13)$$

(для сплошной конструкции $\varepsilon_p = 0$). Постоянство величин b_n , предполагаемое в (9)–(12), возможно в условиях однородного берега при одинаковой конструкции и длине бун.

Величина K , отражающая степень восстановления расхода наносов, должна увеличиваться с ростом расстояния между бунами λ и достигать максимума $K = 1$ при значении $\lambda/2\Lambda = 1$. Исходя из этого, можно принять

$$K = \lambda/2\Lambda. \quad (14)$$

Протяженность области влияния сооружения Λ , согласно результатам [5], может быть оценена как

$$\Lambda = (l_G/l_*)^{0.5} l_*, \quad (15)$$

где l_G – длина буны, а l_* – длина активной части профиля, ограниченной глубиной h_* и возвышением пляжа z_c (рис. 1).

Вдольбереговой расход наносов на входе в систему бун Q_0 (или его эквивалент Q_N) определяет масштаб морфологических изменений и должен оцениваться с достаточной достоверностью. В данном случае используется хорошо зарекомендовавшая себя формула [3, 4]:

$$\begin{aligned} Q_0 &= 0.005\mu_h \left(0.8 + 0.02 \frac{\sqrt{gh_B}}{w_g} \right) \times \\ &\times H_B^2 \sqrt{gh_B} \sin \Theta_B \cos \Theta_B, \end{aligned} \quad (16)$$

где расход выражен в м³/ч, $\mu_h = 3600 \times [(\rho_g/\rho - 1)(1 - \sigma)]^{-1}$, 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_B – глубина обрушения волн 1% обеспеченности в системе (с высотой $H_{1\% \infty}$),

$$h_B = \left(\frac{1}{4\pi\gamma_B^2} \right)^{0.4} H_{1\% \infty}^{0.8} (gT^2)^{0.2} \left(\frac{\cos \Theta_\infty}{\cos \Theta_B} \right)^{0.4}, \quad (17)$$

индексы “ ∞ ” и “ B ” относятся к глубокой воде и к точке обрушения соответственно, $\gamma_B = 0.8$, T – период пика спектра волн. Под величиной H_B в (16) подразумевается среднеквадратичная высота в точке обрушения, которая с учетом рэлеевского распределения высот волн составляет $H_B = 0.37h_B$. Угол подхода волн при обрушении Θ_B (между лучом волны и нормалью к берегу) рассчитывается по закону рефракции $\sin \Theta/C = \text{const}$, где C – скорость распространения волн. Для оценки вдольберегового расхода наносов также можно рекомендовать версию известной формулы CERC, приведенную в [4].

Глубина замыкания h_* при единичном волновом воздействии эквивалентна определенной в (17) глубине обрушения h_B волн 1% обеспеченности [1]. В масштабах года или нескольких лет

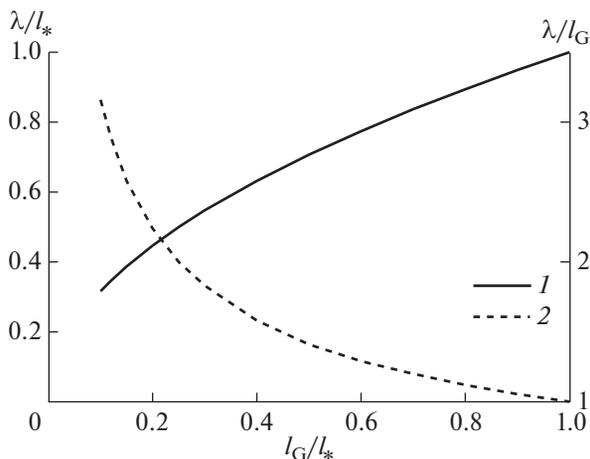


Рис. 3. Оптимальное расстояние между бунами в функции их относительной длины l_G/l_* : 1 — отношение расстояния к длине активного профиля, λ/l_* , 2 — отношение расстояния к длине бун, λ/l_G .

величина h_* определяется высотой штормовых волн H_{s12h} , действующих не менее 12 ч в год [10]:

$$h_* = 2.8H_{s12h}^{2/3} \quad (18)$$

ОПТИМАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУН

Эффективность бун как механизма аккумуляции, согласно формулам (10)–(11), прямо пропорциональна величине $a = b(1-b)(1-K)$. Произведение $b(1-b)$ достигает максимума при $b = 0.5$, а значит, скорость аккумуляции в межбунном кармане максимальна, когда буна задерживает половину транспортируемого вдоль берега материала. Для этого, согласно (13), требуется, чтобы буна выходила на глубину, соответствующую половине глубины замыкания (имеется в виду непроницаемое сооружение).

Аккумулирующая способность бун должна возрастать при уменьшении K , т.е. при уменьшении относительного шага системы (см. формулу (14)). Однако при слишком малом расстоянии между препятствиями поток наносов в силу инерции просто не будет успевать реагировать на них. Введенная ранее длина зоны влияния сооружения Λ , по сути, характеризует расстояние, на котором поток наносов способен перестроиться под влиянием внешних факторов. Следовательно, минимальное расстояние между бунами λ должно быть не меньше Λ , а максимальное, как уже указывалось, не больше 2Λ :

$$\Lambda \leq \lambda < 2\Lambda \quad \text{или} \quad 0.5 \leq K < 1. \quad (19)$$

Данный интервал значений K ограничивает возможный шаг системы бун, а также определяет область применимости нашей модели.

Очевидно, при $\lambda = \Lambda$ или $K = 0.5$ аккумуляция оказывается максимальной. Данному условию, согласно (15), отвечают следующие зависимости между шагом системы бун λ и их длиной l_G :

$$\lambda/l_* = (l_G/l_*)^{0.5} \quad (20)$$

или $\lambda/l_G = (l_G/l_*)^{-0.5}$.

Графики зависимостей (20) показаны на рис. 3.

При увеличении длины бун расстояние между ними также должно возрастать пропорционально $\sqrt{l_G}$. Для коротких бун, $l_G/l_* = 0.1$, оптимальный шаг системы близок к $3l_G$, тогда как для длинных сооружений, $l_G/l_* = 0.5$, расстояние λ должно составлять всего около $1.4l_G$. В связи с этим заметим, что значения λ/l_G , используемые на практике, обычно располагаются в диапазоне от 1 до 3 [7, 11].

ГОДОВЫЕ ОБЪЕМЫ АККУМУЛЯЦИИ И СМЕЩЕНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ

При действии волнения с данными параметрами в течение времени Δt объем аккумуляции в n -ном межбунном отсеке составит $V_n = A_{cn}\Delta t$. Чтобы оценить годовой объем аккумуляции Ω_n , необходимо просуммировать элементарные объемы V_n , подсчитанные для различных градаций направлений (j) и высот (i) волн с учетом их продолжительности в течение года t_{wj} . При этом следует выделить направления слева от береговой нормали (j_L) и справа от нее (j_R) и подсчитать со-

ответствующие объемы $\Omega_n^{(L)} = \sum_{jL} \left(\sum_i Ac_{ni} t_{wi} \right)_{jL}$ и $\Omega_n^{(R)} = \sum_{jR} \left(\sum_i Ac'_{ni} t_{wi} \right)_{jR}$. С учетом соотношений (5) получим

$$\Omega_n = \Omega_n^{(L)} + \Omega_n^{(R)} = a_n \prod_1^n c_n Q_{0\Sigma} + a'_n \prod_1^{N-n} c'_n Q_{N\Sigma}, \quad (21)$$

$$Q_{0\Sigma} = \sum_{jL} \left(\sum_i Q_{0i} t_{wi} \right)_{jL}, \quad Q_{N\Sigma} = \sum_{jR} \left(\sum_i Q_{Ni} t_{wi} \right)_{jR}, \quad (22)$$

где $Q_{0\Sigma}$ и $Q_{N\Sigma}$ – годовые потоки наносов, поступающие соответственно к левой и правой границам поля бун ($m^3/\text{год}$).

Накопление материала приведет к выдвигению пляжа и всего активного профиля берега на среднее расстояние Δx_n . В соответствии с условием сохранения массы и принятым допущением о сохранении свойств активного профиля имеем равенство $\Omega_n = (h_* + z_c) \lambda_n \Delta x_n$, откуда среднее годовое расширение пляжа определится как

$$\Delta x_n = \frac{\Omega_n}{(h_* + z_c) \lambda_n}. \quad (23)$$

На прилегающих участках, расположенных слева и справа от поля бун (S_0 и S_N , рис. 26), годовой баланс наносов определяется разностью суммарных объемов аккумуляции и низового размыва: $\Omega_0 = \sum_{jL} \left(\sum_i Ac_{0i} t_{wi} \right)_{jL} - \sum_{jR} \left(\sum_i Er_{0i} t_{wi} \right)_{jR}$ и $\Omega_N = \sum_{jR} \left(\sum_i Ac_{Ni} t_{wi} \right)_{jR} - \sum_{jL} \left(\sum_i Er_{Ni} t_{wi} \right)_{jL}$. С учетом (4) и (8) результирующие объемы Ω_0 и Ω_N выражаются как

$$\Omega_0 = b_1 Q_{0\Sigma} - \left[1 - (1 - b_1) \prod_1^{N-1} c'_n \right] Q_{N\Sigma}, \quad (24)$$

$$\Omega_N = b_N Q_{N\Sigma} - \left[1 - (1 - b_N) \prod_1^{N-1} c_n \right] Q_{0\Sigma}. \quad (25)$$

Средние годовые смещения береговой линии за краями поля бун Δx_0 и Δx_N определяются по аналогии с (23) как

$$\Delta x_0 = \frac{\Omega_0}{(h_* + z_c) L}, \quad \Delta x_N = \frac{\Omega_N}{(h_* + z_c) L}, \quad (26)$$

где L – протяженность областей возмущений. Воздействие системы бун на прилегающие участки берега подобно воздействию одиночного препятствия соответствующего размера, для которого

длина областей возмущений L увеличивается с течением времени в соответствии с зависимостью [5]:

$$L = \Lambda \sqrt{t_Y}, \quad (27)$$

где Λ определяется из (15), а t_Y – число лет, прошедших после строительства сооружения. Величины Δx_0 и Δx_N , очевидно, могут быть как положительными (берег выдвигается), так и отрицательными (берег отступает).

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ

Для сравнительно небольших интервалов времени годовой объем аккумуляции Ω_n и прирост пляжа Δx_n приблизительно постоянны [15], а полная ширина пляжа X_{cn} прямо пропорциональна числу прошедших лет t_Y : $X_{cn} = t_Y \Delta x_n$. Однако по мере выдвигания пляжа аккумуляция должна замедляться вследствие ослабления улавливающей способности бун. Иначе говоря, при $X_{cn} \rightarrow l_{Gn}$ должно быть $\Omega_n \rightarrow 0$ и $\Delta x_n \rightarrow 0$. Этот тренд учитывается в рассматриваемой модели с помощью функции обратной связи f_n :

$$f_n = [1 - X_{cn}/(l_{Gn} - l_c)]^{0.5}, \quad X_{cn} \geq 0, \quad (28)$$

которая в качестве дополнительного множителя включается в зависимость (21), а также в первые слагаемые в правой части зависимостей (24) и (25). Ширина пляжа X_{cn} подсчитывается суммированием элементарных смещений Δx_n , которые уменьшаются с каждым шагом по времени. Пляж нарастает до тех пор, пока не достигаются равенства $X_{cn} = (l_{Gn} - l_c)$ или $X_{cn} = (l_{Gn+1} - l_c)$, означающие заполнение межбунного кармана S_n и прекращение аккумуляции ($b_n = 0$ или $b_{n+1} = 0$).

Смещения берега за пределами системы X_{c0} и X_{cN} отражают средние изменения в пределах длины L . Однако в случае аккумуляции выдвигание берега непосредственно у сооружения оказывается вдвое больше среднего [2, 5]. Следовательно, достижение условий $X_{c0} = 0.5(l_{G1} - l_c)$ или $X_{cN} = 0.5(l_{GN} - l_c)$ означает заполнение входящего угла у первой или последней буны, которая, таким образом, перестает быть препятствием для вдольберегового транспорта наносов ($b_1 = 0$ или $b_N = 0$). Для отслеживания указанных условий при расчетах рекомендуется использовать шаг по времени порядка 0.1 года.

В качестве иллюстрации приведем несколько примеров 3-х летнего прогноза изменений песчаного морского берега под влиянием системы бун, включающей 5 элементов (рис. 4). Береговой

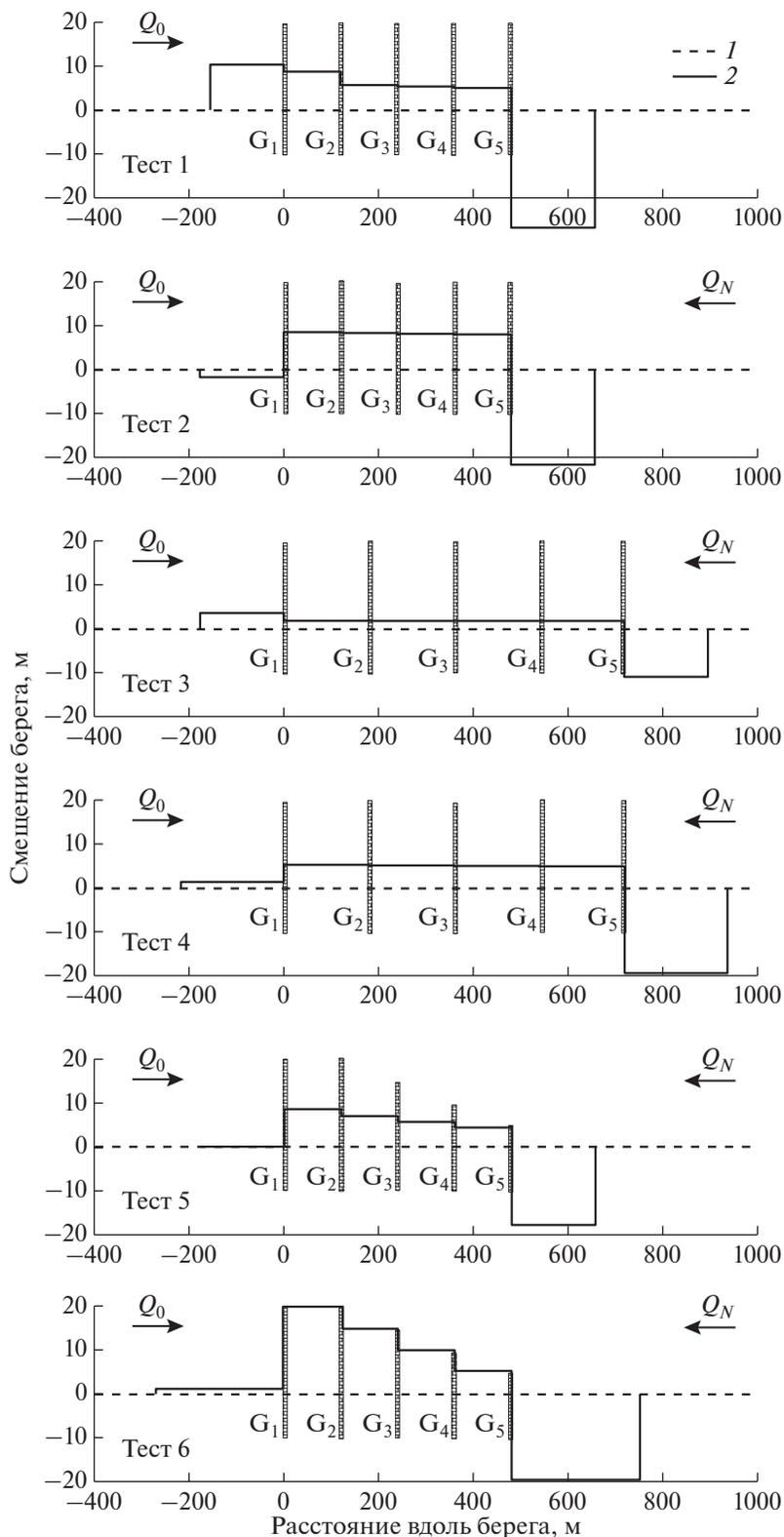


Рис. 4. Примеры прогноза изменений песчаного берега под влиянием системы бун. 1 – начальная береговая линия, 2 – среднее положение берега через 3 года после строительства бун (для теста 6 – через 9 лет). Исходные данные приведены в тексте.

Таблица 1. Условия экспериментов в волновом бассейне [9] и результаты моделирования

Тест	h_G , м	l_G , м	λ , м	Ω_1 , м ³	h_* , м	l_* , м	b	Λ , м	K	A_c , м ³ /ч	$\Omega_1^{(c)}$, м ³
NT3	0.10	2.0	3.2	0.01	0.133	2.3	0.75	2.14	0.75	0.0014	0.011
NT5	0.07	1.6	2.6	0.02			0.53	1.92	0.68	0.0024	0.019

профиль охарактеризуем достаточно типичными параметрами $h_* = 7$ м, $z_c = 1$ м, $l_* = 350$ м, $l_c = 10$ м (см. рис. 1).

Базовая длина сооружений составляет $l_G = 30$ м, глубина на конце $h_G = 1$ м, а шаг системы $\lambda = 120$ м, причем наносы перемещаются либо только в одну сторону (тест 1: $Q_{0\Sigma} = 40$ тыс. м³/год), либо в противоположных направлениях (тесты 2, 3, 4, 5 и 6: $Q_{0\Sigma} = 40$, $Q_{N\Sigma} = 20$ тыс. м³/год).

В тесте 1 через 3 года происходит заполнение входящего угла перед первой буной, ускоряющее аккумуляцию в примыкающем межбунном отсеке. Низовой размыв превышает 25 м. В тесте 2 объем аккумуляции внутри системы увеличивается, а размыв сокращается. Очевидно, при двухстороннем питании негативное влияние бун менее ощутимо.

В тесте 3 исходные данные прежние, за исключением шага системы λ , который увеличен в полтора раза (до 180 м). При этом скорость нарастания пляжа внутри системы падает в несколько раз, что подчеркивает роль параметра λ .

В тесте 4 увеличены длина бун ($l_G = 45$ м) и глубина у их окончания ($h_G = 1.5$ м). В результате возрастают аккумуляция в системе, а также протяженность областей влияния сооружений.

Тесты 5 и 6 относятся к неоднородным бунам, которые последовательно укорачиваются к правому краю поля. Считается, что такая мера помогает уменьшить низовой размыв [8, 11]. В тесте 5 размыв, действительно, меньше, чем в аналогичном тесте 2 с однородными бунами, но при этом сокращается и аккумуляция.

Условия теста 6 те же, но время прогноза увеличено втрое (до 9 лет). К этому времени межбунные отсеки полностью заполняются, наносы обходят сооружения с внешней стороны, низовой размыв прекращается и положение береговой линии стабилизируется.

Приведенные результаты наглядно демонстрируют возможность регулирования эффекта бун с помощью изменения их параметров. Заметим, что контур береговой линии в зонах влияния сооружения может быть определен с помощью модели [5].

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Для верификации модели использовались опубликованные данные, полученные как в лабораторных, так и натуральных условиях.

Пример волнового бассейна. Морфологический эффект бун рассматривался в экспериментальном исследовании [9]. В одном из тестов первоначально плоский песчаный береговой склон подвергался 12-часовому воздействию нерегулярного волнения (значимая высота волн 0.08 м, период спектрального пика 1.15 с, угол подхода 11.6°), в результате чего выработывался устойчивый рельеф. Он служил эталоном для сравнений с рельефом, сформированным при наличии двух непроницаемых бун. Вдольбереговой транспорт наносов составлял в среднем 48 кг/ч, что при стандартных значениях плотности и пористости песка соответствовало объемному расходу $Q_0 = 0.030$ м³/ч.

Условия опытов отражены в табл. 1. Для сравнения выбраны два теста (NT3 и NT5), удовлетворяющие требованию модели $l_G/l_* < 1$. Параметры бун и объемы аккумуляции в межбунном отсеке Ω_1 определены по графикам, приведенным в работе [9].

В правой части табл. 1 представлены расчетные параметры модели. Глубина замыкания h_* принималась равной глубине h_B , определяемой формулой (17). В последней колонке таблицы приведены расчетные объемы аккумуляции $\Omega_1^{(c)}$, которые, как видно, довольно близки к измеренным значениям Ω_1 . Полученные результаты подтверждают отмеченную ранее тенденцию к увеличению скорости аккумуляции A_c при $b \rightarrow 0.5$, а также при уменьшении величины K .

Пример ЮЗ побережья Индии. В работе [14] описан опыт применения бун для наращивания песчаного пляжа на подверженном размыву участке юго-западного побережья Индии. Береговая линия здесь приблизилась непосредственно к возведенной ранее защитной стенке (рис. 5). После строительства двух бун пляж стал быстро нарастать, особенно с внешней стороны буны G_1 , обращенной навстречу доминирующему потоку наносов (70–100 тыс. м³/год).

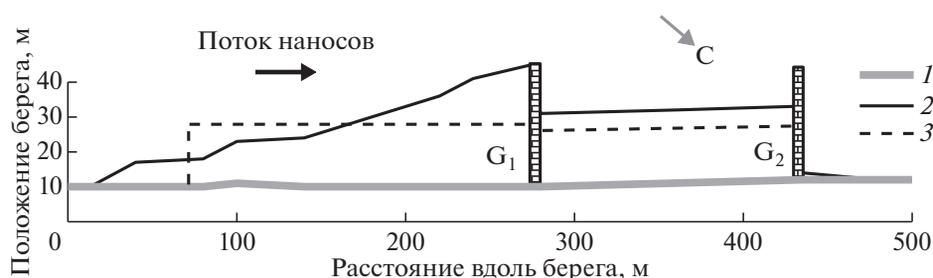


Рис. 5. Изменения берега под влиянием бун (юго-западное побережье Индии [14]). 1 – защитная стенка, маркирующая положение уреза в 2009 г., 2 – положение береговой линии, зафиксированное в 2014 г. (через 5 после строительства бун), 3 – средние смещения берега согласно расчетам.

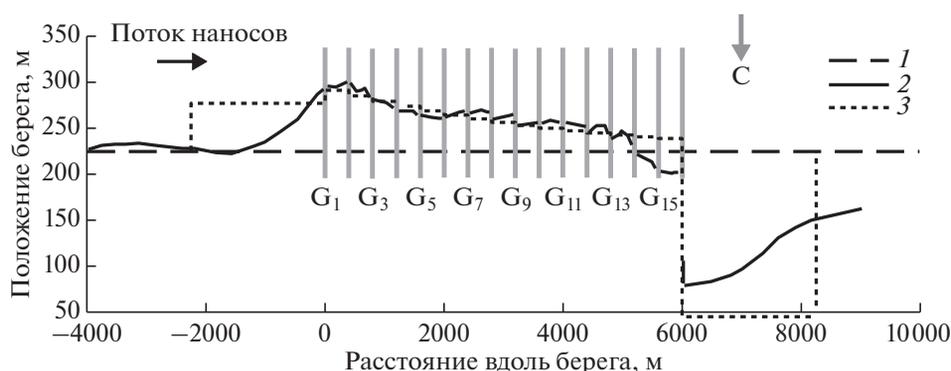


Рис. 6. Эволюция берега на участке Уэстхэмптон Бич, о. Лонг-Айленд [7, 13]. 1 – условная начальная береговая линия 1965 г., 2 – береговая линия 2015 г., отвечающая прогнозу [13], 3 – то же в соответствии с нашей моделью.

Как видно на рис. 5, через 5 лет после строительства бун берег выдвинулся до конца первой буны. Низовой размыв, по-видимому, переместился в область, расположенную за пределами защитной стенки.

При расчетах были приняты следующие параметры берегового профиля и бун: $Q_{0\Sigma} = 85$ тыс. м³/год, $h_* = 7$ м, $l_* = 300$ м, $z_c = 0$, $l_c = 0$, $l_G = 35$ м, $h_G = 0.7$ м, $\lambda = 150$ м. Прогнозируемое положение береговой линии также показано на рис. 5. Согласно расчетам, за 3.5 года пляж должен был выдвинуться до конца первой буны, что должно было ускорить аккумуляцию в межбунном отсеке. Предсказанные и измеренные смещения берега одного порядка.

Пример побережья о. Лонг-Айленд. Речь идет о береговом участке Уэстхэмптон Бич, где для защиты от штормовых размывов была построена система из 16 бун (рис. 6). Строительство началось в 1965 г. и продолжалось несколько лет.

Объектом для сравнения в данном случае служит береговая линия 2015 г., предсказанная по модели [13] на основе исходных данных 1995 г.

(рис. 6). В наших расчетах за основу была принята условная прямая линия берега, предположительно, отражающая его среднее положение в 1965 г. и, таким образом, срок нашего прогноза – 50 лет. Использовались следующие значения параметров берега и системы бун: $Q_{0\Sigma} = 100$ тыс. м³/год, $h_* = 8$ м, $l_* = 700$ м, $z_c = 3$ м, $l_c = 30$ м, $l_G = 145$ м, $h_G = 2.5$ м, $\lambda = 400$ м. Фактические параметры отдельных бун несколько отличаются друг от друга, но при расчетах они принимались однородными.

Как видно на рис. 6, наиболее заметные различия результатов расчетов по двум моделям отмечаются у левого края поля (буна G_1), где наша модель завышает аккумуляцию, а также у правого края (буны $G_{14}–G_{16}$), где модель [13] предсказывает размыв. В остальном обе расчетные береговые линии повторяют друг друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель объясняет аккумуляцию в системе бун с позиций закона сохранения массы. Осаждение материала в межбунных отсе-

ках связывается с градиентом вдольберегового потока наносов, проходящего через поле бун. Скорость процесса контролируется как величиной потока, так и параметрами сооружений. Временной масштаб моделируемых морфологических изменений варьируется от нескольких часов (отдельные волновые ситуации) до нескольких лет.

Одним из ключевых параметров модели является протяженность зоны влияния сооружения Λ . Скорость аккумуляции в системе бун оказывается максимальной, когда расстояние между ними близко к Λ . Если же указанное расстояние достигает 2Λ , то накопление материала в межбунных карманах прекращается.

Хотя величина Λ довольно условна, ее введение помогает упростить анализ проблемы и найти оптимальные соотношения между шагом системы бун λ , их длиной l_G и шириной активной области берегового профиля l_* . Для коротких бун (l_G/l_* около 0.1) оптимальное расстояние между ними близко к $3l_G$, тогда как для длинных сооружений (l_G/l_* около 0.5) оно составляет $1.4l_G$.

Длина бун тесно связана с другим параметром модели, b , характеризующим долю потока наносов, перехваченную буной. Максимуму аккумуляции отвечает значение $b = 0.5$, подразумевающее, что буна оканчивается на глубине, составляющей половину глубины замыкания. Это однако означает серьезное вмешательство в природные процессы. Для снижения уровня воздействий, по-видимому, лучше использовать более короткие буны, отвечающие меньшим значениям b , что целесообразно и по экономическим соображениям.

Основными показателями проекта, связанного с бунами, являются объемы аккумуляции, расширение пляжа и низовой размыв на заданный момент времени. Приведенные примеры расчетов показывают, как можно управлять параметрами системы бун, чтобы достичь поставленной цели и уменьшить нежелательные явления. Смягчение последних может быть достигнуто путем внесения дополнительного количества материала в межбунные отсеки.

Для краткосрочного прогноза в ряде случаев допустимо условие равномерного накопления материала и нарастания пляжа в межбунных отсеках. Вместе с тем, по мере приближения края пляжа к головной части буны аккумуляция должна замедляться. Эта тенденция учитывается в рассматриваемой модели включением функции обратной связи, зависящей от отношения текущей ширины пляжа к длине буны. Результаты расчетов в основном подтверждают опубликованные данными наблюдений.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 0149-2019-0005) при частичной поддержке РФФИ (гранты № 18-55-3402 Куба_т и № 18-05-00741).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев И.О. Динамика прибойной зоны. М.: Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, 1989. 184 с.
2. Леонтьев И.О. Изменения береговой линии моря в условиях влияния гидротехнических сооружений // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 940–946.
3. Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с.
4. Леонтьев И.О. О расчете вдольберегового транспорта наносов // Океанология. 2014. Т. 54. № 2. С. 226–232.
5. Леонтьев И.О. Изменения контура берега, вызванные поперечным сооружением в береговой зоне моря // Геоморфология. 2018. № 3. С. 32–39. <https://doi.org/10.7868/S0435428118030033>
6. Пешков В.М. Береговая зона моря. Краснодар: Лаконт, 2003. 350 с.
7. Прушак З., Островский Р., Бабаков А.Н., Чубаренко Б.В. Основные принципы использования бун в качестве берегозащитных сооружений // Геоморфология. 2014. № 3. С. 91–104.
8. СП 277.1325800.2016. Свод Правил. Сооружения морские берегозащитные. Минстрой России. Москва, 2016.
9. Badiei P., Kamphuis J.W., Hamilton D.G. Physical experiments on the effects of groins on shore morphology. // 24th Int. Conf. on Coastal Eng. ASCE. Kobe, Japan, 1994. P. 1782–1796.
10. Capobianco M., Larson M., Nicholls R.J. Kraus N.C. Depth of closure: a contribution to the reconciliation of theory, practice and evidence // Int. Conf. "Coastal Dynamics'97". Plymouth, 1997. P. 506–515.
11. Coastal Engineering Manual (CEM). Part V. Chap. 3. Shore protection project. EM 1110–2–1100. 2002.
12. Hanson H. GENESIS: a generalized shoreline change numerical model // J. of Coastal Res. 1989. V. 5. № 1. P. 1–27.
13. Hanson H., Larson M., Kraus N.C. Calculation of beach under interacting cross-shore and longshore processes // Coastal Engineering. 2010. V. 57. P. 610–619.
14. Noujas V., Thomas K.V., Ajeesh N.R. Shoreline management plan for a protected but eroding coast along the south-west coast of India // International Journal of Sediment Research. 2017. № 2. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.02.004i>
15. Schoonees J., Theron A., Bevis D. Shoreline accretion and sand transport at groynes inside the port of Richard Bay // Coastal Engineering. 2006. V. 53. P. 1045–1058.
16. Süme V. Shoreline changes in three groin fields on the eastern Black Sea coast // Fresenius Environmental Bulletin. 2018. V. 28. № 1. P. 125–131.

The Effect of a Groin Field on a Sandy Beach

I. O. Leont'yev^{a, #}, T. M. Akivis^{a, ##}

^a*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*

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

^{##}*e-mail: akivis@yandex.ru*

A model explaining sediment accumulation within the system of groins from the point of view of mass conservation has been developed. The model revealed that the sedimentation between the groins is connected to the gradient of the adjacent alongshore sediment transport. The important model parameter is the length Λ of the influence zone of the construction. It is shown that the accumulation rate reaches its maximum when the distance between the groins is close to Λ whilst the accretion of the material terminates when the distance is close to 2Λ . The optimal relationships between the groins separation distance, their length and the sediment flux width has been obtained. This allows operational forecasting of the accumulation volume and the distance over which the beach advances within time periods from hours till decades. The model is capable of calculating optimal parameters of the groins system, to achieve the required performance and avoid unnecessary effects. The calculations are in reasonable agreement with published observations.

Keywords: groin field, sandy beach, longshore sediment transport, accretion, down-drift erosion