

Методика научных исследований

УДК 551.435.3

© 2018 г. И.О. ЛЕОНТЬЕВ

ИЗМЕНЕНИЯ КОНТУРА БЕРЕГА, ВЫЗВАННЫЕ ПОПЕРЕЧНЫМ
СООРУЖЕНИЕМ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ*Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН, Москва, Россия**E-mail: igor.leontiev@gmail.com*

Поступила в редакцию 21.06.2017

Рассматривается модель, позволяющая осуществлять оперативный прогноз изменений контура берега в окрестностях сооружений типа мола, буны или коффердама. Исходными данными служат характеристики профиля берега, размеры сооружения и суммарные годовые потоки наносов. Контур берега с обеих сторон препятствия описывается в общем случае вогнутой кривой. Среднее смещение береговой линии A прямо пропорционально объему наносов, аккумуляционному u сооружения. Протяженность зоны воздействия на берег Λ зависит как от длины сооружения, так и от ширины потока наносов. С течением лет t смещение A и длина Λ увеличиваются пропорционально \sqrt{t} . Проверка модели проведена на основе опубликованных данных, относящихся к молам, ограждающим подходной канал или акваторию порта. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: контур берега, поперечное сооружение (мол, буна, коффердам), зона влияния сооружения, вдольбереговой поток наносов, смещение береговой линии, аккумуляция, размыв.

DOI: 10.7868/S0435428118030033

CHANGES IN SHORELINE CONTOUR DUE TO CROSS-SHORE STRUCTURE
IN THE SEA COASTAL ZONE

I.O. LEONT'YEV

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

Summary

A model is suggested to predict the shoreline changes in the vicinity of coastal structures of the type of jetty, cofferdam or groin. Input data comprise the characteristics of coastal profile, dimensions of structure and the annual alongshore sediment fluxes. Shoreline contour from each side of the obstacle is described in general by a concave curve. Mean shoreline displacement A is proportional to the sediment volume trapped by a structure. Extension Λ of the area where the structure influences the shoreline contour depends on both the length of structure and the width of sediment flux. Displacement A and the length Λ tend to increase with the time t in proportion to \sqrt{t} . Verification of the model is based on the published data on shoreline changes due to a jetty protecting a navigational channel or a port basin. An example of model calculation is given.

Keywords: shoreline contour, cross-shore structure (jetty, groin, cofferdam), zone of structure influence, longshore sediment flux, shoreline displacement, accretion, erosion.

$$S^{(L)} = S_A^{(L)} + S_E^{(R)}, \quad S^{(R)} = S_A^{(R)} + S_E^{(L)}. \quad (1)$$

Основываясь на результатах наблюдений, смещения S_A можно аппроксимировать линейной функцией, а S_E – полуволной синусоиды (рис. 1). Это приводит к соотношениям

$$\begin{aligned} -\Lambda \leq x \leq 0, \quad S_A^{(L)} &= 2A^{(L)} \frac{\Lambda + x}{\Lambda}, \quad S_E^{(R)} = \frac{\pi}{2} A^{(R)} \sin \frac{\pi x}{\Lambda}, \\ 0 \leq x \leq \Lambda, \quad S_A^{(R)} &= 2A^{(R)} \frac{\Lambda - x}{\Lambda}, \quad S_E^{(L)} = -\frac{\pi}{2} A^{(L)} \sin \frac{\pi x}{\Lambda}, \end{aligned} \quad (2)$$

где x – расстояние вдоль берега, которое отсчитывается от створа сооружения, Λ – протяженность областей влияния сооружения – аккумуляции (перед молом) и размыва (ниже по течению), A – средняя величина смещений береговой линии (рис. 1).

Поток наносов действует в пределах активной части профиля, под которой понимается область значимых штормовых деформаций дна, фиксируемых в течение года. Со стороны моря она ограничена глубиной замыкания h_* , отвечающей принятой минимальной величине деформаций δ_{\min} (например, $\delta_{\min} = 0.1$ м), а со стороны суши – максимальным возвышением пляжа z_c (рис. 1). Допуская, что форма активного профиля в среднем не меняется, и он весь смещается вслед за береговой линией на расстояние A , можно оценить изменения объема наносов в пределах области влияния сооружения Λ величиной $\Lambda A (h_* + z_c)$. Последняя, согласно условию сохранения массы, должна быть эквивалентна объему аккумуляции наносов у сооружения Ω_p . Соответственно средние смещения берега $A^{(L)}$ и $A^{(R)}$ определяются как:

$$A^{(L)} = \frac{\Omega_p^{(L)}}{(h_* + z_c)\Lambda}, \quad A^{(R)} = \frac{\Omega_p^{(R)}}{(h_* + z_c)\Lambda}, \quad (3)$$

где $\Omega_p^{(L)}$ и $\Omega_p^{(R)}$ – среднегодовые объемы материала, аккумулярованные у левой (L) и правой (R) сторон сооружения.

В качестве порога значимых деформаций дна в дальнейшем принимаем значение $\delta_{\min} = 0.1$ м, и соответствующую глубину замыкания оцениваем по формуле [4]:

$$h_* = 2.8 H_{s12h}^{2/3}, \quad (4)$$

где H_{s12h} – значительная высота волн, действующих не более 12 ч в году (имеющих обеспеченность около 0.14%).

Масштаб длины областей возмущения Λ определяется шириной потока наносов l_* (расстоянием от берега до глубины h_*) и длиной сооружения l_p :

$$\begin{aligned} \Lambda &= \alpha_p (l_p / l_*)^{0.5} l_*, \quad h_p \leq h_*, \\ \Lambda &= \alpha_p l_*, \quad h_p \geq h_*, \end{aligned} \quad (5)$$

где h_p – глубина у его конца, α_p – коэффициент порядка 1.

Объем наносов, задержанный сооружением

Объемы материала $\Omega_p^{(L)}$ и $\Omega_p^{(R)}$, аккумулярованные у сооружения за период года, оцениваются с учетом эмпирического соотношения Хансона [2]:

$$\Omega_p^{(L)} = (1 - \varepsilon_p) \frac{h_p}{h_*} Q_{\Sigma}^{(L)}, \quad \Omega_p^{(R)} = (1 - \varepsilon_p) \frac{h_p}{h_*} Q_{\Sigma}^{(R)}, \quad h_p \leq h_*,$$

$$\Omega_p^{(L)} = (1 - \varepsilon_p)Q_\Sigma^{(L)}, \quad \Omega_p^{(R)} = (1 - \varepsilon_p)Q_\Sigma^{(R)}, \quad h_p \geq h_*, \quad (6)$$

где $Q_\Sigma^{(L)}$ и $Q_\Sigma^{(R)}$ – годовые потоки наносов, направленные к той или другой сторонам сооружения, ε_p – проницаемость сооружения (для сплошной конструкции $\varepsilon_p = 0$).

Потоки определяются суммированием интегральных расходов Q_i , вычисленных для каждой i -той волновой ситуации по всем волновым румбам j_L и j_R :

$$Q_\Sigma^{(L)} = \sum_{j_L} \left(\sum_i Q_i t_{wi} \right)_{j_L}, \quad Q_\Sigma^{(R)} = \sum_{j_R} \left(\sum_i Q_i t_{wi} \right)_{j_R}. \quad (7)$$

где t_{wi} – длительность i -той волновой ситуации. Значения Q_i могут быть рассчитаны, например, по зависимости, представленной в [5, 6].

Заметим, что при уменьшении размера донных частиц расходы Q_i увеличиваются, а значит, объемы аккумуляции у сооружения и смещения береговой линии при этом также возрастают.

Смещения берега как функция времени

Соотношения (3) и (5) характеризуют средние смещения берега за 1 год после строительства сооружения. Если потоки наносов в дальнейшем остаются постоянными, то в течение последующих t лет у сооружения будет аккумулирован объем наносов $\Omega_{pt} = \Omega_p t$, где Ω_p – объем, задержанный в первый год. Тогда из соотношений (3), где величина $(h_* + z_c)$ не меняется, имеем

$$A_t \Lambda_t = A \Lambda t, \quad (8)$$

где индекс t соответствует заданному интервалу времени. Допуская, что значения A и Λ изменяются пропорционально,

$$A_t / \Lambda_t = A / \Lambda, \quad (9)$$

приходим к результату

$$A_t = A \sqrt{t}, \quad \Lambda_t = \Lambda \sqrt{t}. \quad (10)$$

Таким образом, амплитуда смещений берега и протяженность областей влияния сооружения будут увеличиваться со временем пропорционально \sqrt{t} , что согласуется с теоретическим результатом [1]. Зависимость (10) действительна до тех пор, пока движение берега у препятствия мало по сравнению с его длиной, $A_t / l_p \ll 1$. Выполнение этого условия для сооружений типа оградительных молов обычно ограничивается сроком от нескольких лет до нескольких десятков лет.

Сравнение с данными наблюдений

Для проверки изложенной модели были использованы опубликованные данные об изменениях береговой линии под влиянием молв, ограждающих подходной канал или акваторию порта. Исходные данные для трех рассмотренных участков берега, а также расчетные показатели морфологических изменений отражены в таблице.

При расчетах предполагалось, что молы задерживают весь объем наносов, перемещающихся вдоль берега, и соответственно $\varepsilon_p = 0$, $l_p \approx l_*$, $h_p \approx h_*$, $\Omega_p^{(L)} \approx Q_\Sigma^{(L)}$ и $\Omega_p^{(R)} \approx Q_\Sigma^{(R)}$. Возвышение пляжа z_c принималось равным 2 м. Протяженность зон влияния сооружения Λ_t вычислялась при значении коэффициента $\alpha_p = 1$.

На участке порта Владиславово [7] доминирует перенос мелкого и среднего песка в восточном направлении (слева направо на рис. 2а). Берег восточнее порта защищен

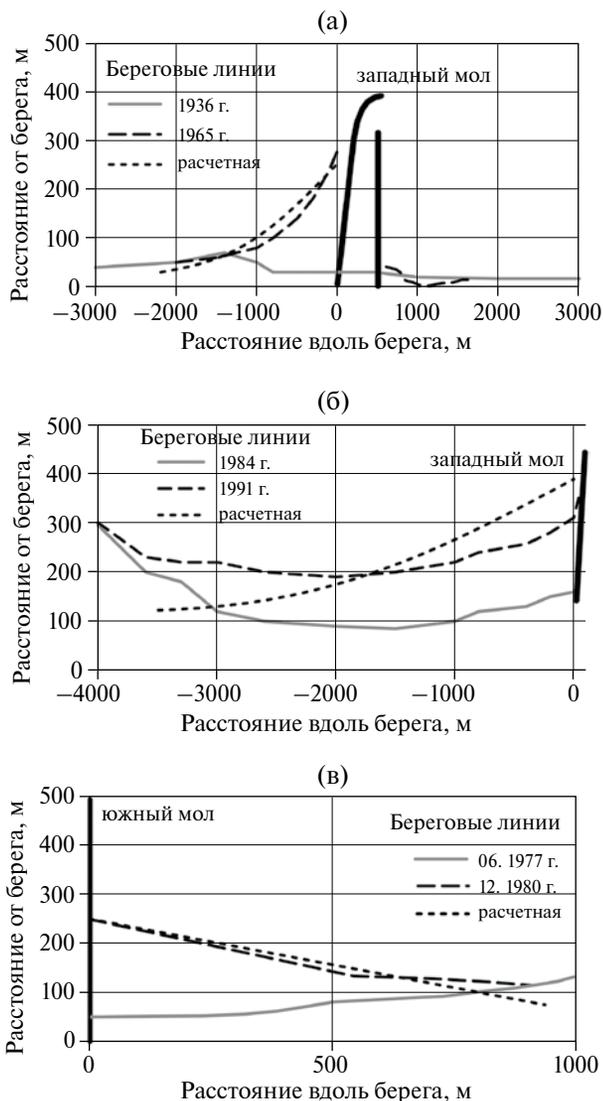


Рис. 2. Изменения контура берега под влиянием портовых молов

(а) – порт Владиславово (польское побережье Балтики), (б) – порт Дамьетта (район дельты Нила), (в) – порт Оараи (тихоокеанское побережье Японии)

рис. 2в). Поступление наносов с противоположной стороны блокируется волноломом. Связанный с этим низовой размыв в силу особенностей берега и конструкции сооружения проявляется на значительном удалении и не затрагивает участок, примыкающий к южному молу, что позволяет принять при расчетах $Q_{\Sigma}^{(L)} = 0$ и $A_t^{(L)} = 0$. На основе данных батиметрических съемок, приведенных в [9], объем материала, аккумулированный с южной стороны мола за 3.5 года, можно оценить как примерно 500 тыс. м³, что соответствует величине годового потока наносов $Q_{\Sigma}^{(R)}$ около 140 тыс. м³/год. Контур берега в зоне влияния сооружения близок к прямой линии. Расчетный контур также описывается линейной зависимостью

бетонной стенкой и серией бун и потому не испытывал существенного размыва. Высота волн, фиксируемая в данном районе при наиболее сильных штормах, близка к 3.6 м, что, согласно формуле (4), отвечает глубине замыкания $h_* = 6.6$ м. Расчетная линия берега перед западным молом определяется, согласно (1) и (2), зависимостью

$$S_t^{(L)} = y_r + 2A_t^{(L)} \frac{\Lambda_t + x}{\Lambda_t} + \frac{\pi}{2} A_t^{(R)} \sin \frac{\pi x}{\Lambda_t}, \quad -\Lambda_t \leq x \leq 0, \quad (11)$$

где y_r – среднее положение исходного берега относительно базовой (нулевой) линии в пределах зоны влияния сооружения, индекс t соответствует заданному числу лет (в данном случае 30 лет).

На участке порта Дамьетта [8] преобладает движение наносов (преимущественно мелко-го песка) в восточном направлении (слева направо на рис. 2б). Низовой размыв берега с восточной стороны порта в значительной мере нейтрализован подсыпкой материала, полученного при углублении акватории. Расчетная кривая контура берега перед западным молом соответствует зависимости (11).

На участке порта Оараи [9] объектом рассмотрения является берег у южного мола, который перехватывает поток наносов (мелкий песок), направленный на север (справа налево на

Исходные данные и расчетные параметры изменений берега

Береговой участок	Исходные данные					Расчетные параметры			
	l_p	$h_* + z_c$	$Q_{\Sigma}^{(L)}$	$Q_{\Sigma}^{(R)}$	t	Λ_t	$A_t^{(L)}$	$A_t^{(R)}$	y_r
	м		$10^3 \text{ м}^3/\text{год}$		годы	км	м		
Владиславово [7]	400	8.6	70	20	30	2.19	111	31.8	30
Дамьетта [8]	1300	10	660	260	7	3.45	135	53.0	120
Оараи [9]	500	6	0	140	3.5	0.94	0	87	75

Примечание: обозначения исходных данных и расчетных параметров объяснены в тексте.

$$S_t^{(R)} = y_r + 2A_t^{(R)} \frac{\Lambda_t - x}{\Lambda_t}, \quad 0 \leq x \leq \Lambda_t,$$

и в основном совпадает с наблюдаемым (рис. 2в).

Отклонения расчетов от наблюдений в значительной мере обусловливаются кривизной исходного контура берега, который в модели рассматривается как прямой. С учетом этого обстоятельства можно заключить, что модель в целом правильно предсказывает протяженность зон влияния сооружения Λ , и коэффициент α_p в формуле (5) близок к единице. Также принимая во внимание приблизительный характер сведений в отношении параметров потоков наносов, соответствие расчетных и наблюдаемых смещений береговой линии в целом можно признать удовлетворительным.

Пример прогноза

В качестве иллюстрации применим изложенную модель к морскому берегу в корневой части Вислинской косы (район пос. Скворонки), где планируется создание прорези для обеспечения судоходства между Гданьским и Вислинским заливами Балтийского моря. Для ограждения подтождного канала предполагается строительство молв длиной $l_p = 400$ м до глубины $h_p = 5$ м.

При высоте волн $H_{s12h} = 4.2$ м глубина замыкания здесь в соответствии с (4) составляет $h_* = 7.3$ м, а потоки наносов оцениваются как $Q_{\Sigma}^{(L)} = 54.0$ и $Q_{\Sigma}^{(R)} = 47.4$ тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ [10]. Объемы наносов, которые будут задерживаться молами, определяются из соотношений (6) как $\Omega_p^{(L)} = 37.0$ и $\Omega_p^{(R)} = 32.5$ тыс. $\text{м}^3/\text{год}$.

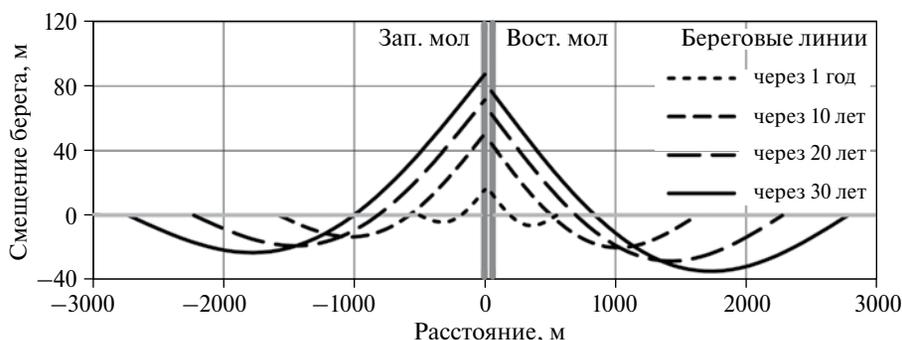


Рис. 3. Расчетные изменения береговой линии через 1, 10, 20 и 30 лет после планируемого строительства молв в корневой части Вислинской косы

Потенциальные изменения береговой линии в окрестностях молов через различные сроки после строительства, рассчитанные на основе соотношений (1), (2), (4), (5) и (10), показаны на рис. 3. У молов берег будет выдвигаться, а во внешних частях зон влияния — отступать. Через 30 лет воздействие сооружений будет ощущаться в береговой полосе общей протяженностью около 6 км (по 3 км с каждой стороны). Максимальное выдвигание берега у западного мола превысит 80 м, максимальное отступление с восточной стороны составит около 40 м. Негативные последствия могут быть смягчены перемещением части материала из областей аккумуляции в области размыва.

Заключение

Препятствие на пути вдольберегового потока наносов провоцирует появление зон аккумуляции и размыва. Контур берега в первой из зон предлагается аппроксимировать линейной функцией, а во второй — полуволной синусоиды. При перемене направления потока соответствующие зоны меняются местами, и результирующий контур представляется суммой указанных функций, что в общем случае обуславливает его вогнутую форму с обеих сторон препятствия.

Процедура модельных расчетов весьма проста. Набор исходных данных включает параметры активного профиля берега, размеры сооружения и суммарные годовые потоки наносов с обеих его сторон. Главными расчетными показателями изменений являются протяженность области влияния препятствия Λ и среднее смещение береговой линии A . Величина Λ зависит как от длины сооружения, так и от ширины потока наносов, а величина A прямо пропорциональна аккумулярованному объему наносов. С течением лет t смещение A и длина Λ увеличиваются пропорционально \sqrt{t} .

Проверка модели проведена на основе опубликованных данных, относящихся к условиям портовых молов, задерживающих основную часть вдольбереговых потоков наносов. Расчеты в целом согласуются с наблюдениями. Единственный калибровочный коэффициент модели (α_p), по-видимому, близок к 1.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-05-08239, № 16-05-00364А и № 16-55-76002 ЭРА_а).

Acknowledgements. The work was supported by the RFBR (projects №№ 15-05-08239, 16-05-00364А and 16-55-76002 ERA_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pelnaud-Considère R.* Essai de theorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets // *Quatr. J. hydraulique.* Paris. 1956. Question 3. Rapp. № 1.
2. *Hanson H.* GENESIS: a generalized shoreline change numerical model // *J. of Coastal Res.* 1989. Vol. 5. No. 1. P. 1–27.
3. *Леонтьев И.О.* Изменения береговой линии моря в условиях влияния гидротехнических сооружений // *Океанология.* 2007. Т. 47. № 6. С. 940–946.
4. *Capobianco M., Larson M., Nicholls R.J., and 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.
5. *Леонтьев И.О.* Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с.
6. *Леонтьев И.О.* О расчете вдольберегового транспорта наносов // *Океанология.* 2014. Т. 54. № 2. С. 226–232.
7. *Szmytkiewicz M., Biegowski J., Kaczmarek L.M., Okroj T., Ostrowski R., Pruszek Z., Rozynsky G., and Skaja M.* Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data // *Coastal Engineering.* 2000. Vol. 40. P. 119–139.
8. *El-Asmar H.M. and White K.* Changes in coastal sediment transport process due to construction of new Damietta harbor, Nile Delta, Egypt // *Coastal Engineering.* 2002. Vol. 46. P. 127–138.

9. Kraus N.C. and Harikai S. Numerical model of the shoreline change at Oarai Beach // *Coastal Engineering*. 1983. Vol. 7. P. 1–28.
10. Леонтьев И.О. Прогнозирование развития берега в масштабе столетия на примере Вислинской косы // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 757–767.

REFERENCES

1. Pelnard-Considére R. Essai de theorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. *Quatr. J. hydraulique*. Paris. 1956. Question 3. Rapp. No. 1.
2. Hanson H. GENESIS: a generalized shoreline change numerical model. *J. of Coastal Res.* 1989. Vol. 5. No 1. P. 1–27.
3. Leont'yev I.O. Changes in the shoreline caused by coastal structures. *Okeanologiya (Moscow)*. 2007. Vol. 47. No. 6. P. 877–883. (in Russ.)
4. Capobianco M., Larson M., Nicholls R.J., and 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.
5. Leont'yev I.O. *Morfodinamicheskie protsessy v beregovoy zone morya* (Morphodynamic processes in the coastal zone of the sea). Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 251 p. ISBN: 978-3-659-62831-3.
6. Leont'yev I.O. Calculation of longshore sediment transport. *Okeanologiya (Moscow)*. 2014. Vol. 54. No. 2. P. 226–232. (in Russ.)
7. Szmytkiewicz M., Biegowski J., Kaczmarek L.M., Okroj T., Ostrowski R., Pruszek Z., Rozynsky G., and Skaja M. Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data. *Coastal Engineering*. 2000. Vol. 40. P. 119–139.
8. Kraus N.C. and Harikai S. Numerical model of the shoreline change at Oarai Beach. *Coastal Engineering*. 1983. Vol. 7. P. 1–28.
9. El-Asmar H.M. and White K. Changes in coastal sediment transport process due to construction of new Damietta harbor, Nile Delta, Egypt. *Coastal Engineering*. 2002. Vol. 46. P. 127–138.
10. Leont'yev I.O. Predicting shoreline evolution on a centennial scale using the example of the Vistula (Baltic) Spit. *Okeanologiya (Moscow)*. 2012. Vol. 52. No. 5. P. 757–767. (in Russ.)