

Влияние подводных структур на транспорт наносов в береговой зоне

Д. В. Корзинин*, Я. В. Сапрыкина

Институт океанологии РАН им. П. П. Ширшова, Москва, Россия

**E-mail: korzinin2000@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.03.2018 г., после доработки 07.05.2018 г.

Подводные структуры, используемые в качестве волногасителей, могут влиять не только на волновые параметры, но и на параметры транспорта наносов в береговой зоне. Применяемые в современной практике подводные волноломы имеют небольшое заглубление, что отрицательно влияет на судоходство и водообмен между приурезовой зоной и открытой акваторией. Оптимальное расположение подводной структуры может позволить найти решение проблемы размыва пляжей с целью сохранения эстетической привлекательности побережья. В статье путем численного моделирования с применением модели *Xbeach* исследуется влияние подводного волногасителя в виде сплошного непроницаемого бара на транспорт наносов в зависимости от разных параметров волн и от его положения относительно береговой линии. Используются соотношения параметров волн и подводной структуры, при которых происходит наиболее эффективное уменьшение высоты волны и периода. Исследовано изменение транспорта наносов при различном положении бара относительно береговой линии. Выявлено, что при наличии подводного бара транспорт наносов в сторону моря может уменьшаться в два раза. Показано, что наибольший эффект снижения размыва берега при наличии подводного бара вызывается волнами с крутизной более чем 0,04. Расположение подводного бара ближе к берегу снижает транспорт наносов в сторону моря для пологих волн и увеличивает его для крутых волн. Минимизация расхода наносов в сторону моря возможна в случае, если подводный бар установлен так, чтобы волны, проходящие над ним, были на грани обрушения, но не обрушались.

Ключевые слова: подводные структуры, трансформация волн, крутизна волн, транспорт наносов, размыв берега.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания (тема № 0149-2018-0015).

Для цитирования: Корзинин Д. В., Сапрыкина Я. В. Влияние подводных структур на транспорт наносов в береговой зоне // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 5. С. 389–398. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-389-398

Influence of the Underwater Structures upon the Sediment Transport in the Coastal Zone

D. V. Korzinin*, Ya. V. Saprykina

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia Federation

**e-mail: korzinin2000@mail.ru*

Significantly deepened coastal structures regarded as wave breakers can influence both upon the wave and the sediment transport parameters in the coastal zone. The wave breakers applied at present are placed not deep and this factor negatively influences navigation and water exchange between the coast line zone and the open sea. Optimal location of the underwater structure permits to arrive at a solution of the beach erosion problem with the purpose of preserving aesthetic attraction of the coast. Due to numerical modeling using the *Xbeach* model, studied is the influence of the significantly deepened solid and impermeable bar upon the sediment transport depending on different wave parameters and the bar location relative to the coastline. The applied ratios between the parameters of the waves and the underwater structure provided the most effective wave height and period decrease. Changes in the sediment transport at various locations of a bar relative the coast line are studied. It is revealed that presence of the underwater bar promotes double reduction of the offshore sediment transport. It is shown that the highest effect in reducing the coast erosion (in case the underwater bar is present) is achieved for

© Корзинин Д. В., Сапрыкина Я. В., 2018

the waves whose steepness exceeds 0.04. Location of the bar closer to the coast results in the offshore sediment transport decrease for the flat waves and increase – for the steep ones. The offshore sediment transport can be minimized in case the underwater bar position is such that the waves passing over it do not break down, but remain on the verge of breaking.

Keywords: underwater structures, wave transformation, wave steepness, sediment transport, coastal erosion.

Acknowledgements: the investigations are carried out within the framework of the state task (theme № 0149-2018-0015).

For citation: Korzinin, D.V. and Saprykina, Ya.V., 2018. Influence of the Underwater Structures upon the Sediment Transport in the Coastal Zone. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(5), pp. 389-398. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-389-398 (in Russian).

Постановка задачи и методы

Размыв дна и берегов под действием штормовых волн является одной из основных проблем в задачах защиты объектов береговой зоны. Волны при распространении над наклонным дном и уменьшении глубины воды под воздействием нелинейных процессов трансформируются, меняют свою форму, становятся асимметричными, что приводит к их обрушению. Обрушение волн может способствовать прекращению потока наносов, направленного в сторону берега, выносу материала дна в сторону моря компенсационным противотечением и катастрофическому размыву дна. Подводные структуры, например в виде баров, влияют на характер трансформации волн над ними и тем самым на интенсивность диссипации волновой энергии в приурезовой зоне и количество материала, вынесенного в сторону моря.

Используемые в современной практике подводные волноломы, как правило, имеют небольшое заглубление (не более 0,75 м согласно СП 277.1325800.2016), что отрицательно влияет на судоходство и экологические аспекты освоения береговой зоны, такие как эстетическая привлекательность побережья и водообмен между мелководной зоной и внешней частью акватории. Анализ опыта использования подводных структур с заглублением от 0,5 до 1,5 м относительно уровня воды на побережьях США, Японии, Италии и Австралии показал, что в 7 из 10 рассматриваемых случаев наблюдается эрозия [1]. Данный факт свидетельствует о том, что влияние подводной структуры на трансформацию волн и последующий волновой транспорт наносов недостаточно изучено и, возможно, место размещения подводной структуры имеет ключевое значение. Посредством физических экспериментов (отчет Delft Hydraulics*, а также [2, 3]) было выявлено, что небольшая глубина воды над подводной структурой в большей степени влияет на уменьшение высоты волны, проходящей над ней, чем в случае со значительным заглублением структуры. Отдельные исследования показали, что при увеличении глубины воды, т. е. большем заглублении, возможно уменьшение среднего периода до 25–40% [4, 5].

* *Smith G. M.* AmWaj Island development, Bahrain : Physical modelling of submerged breakwaters. Report H4087 for OSSIS property development. Deltares (WL), 2002. 35 p. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:7efc8aeb-4fc4-447f-a4d5-fd5c642af777/datastream/OBJ/download> (дата обращения: 01.05.2018).

Исследование трансформации волн над подводными барами в волновом лотке [6, 7] и с помощью модели *SWASH* [8, 9] позволило определить оптимальные сочетания волновых параметров и параметров бара, при которых происходят максимальные изменения высоты волны и периода. Для того чтобы подводная структура была эффективным берегозащитным сооружением, необходимо при ее установке учитывать не только локальные изменения параметров волн над ней, но и сценарии последующей трансформации волн до берега, минимизирующие влияние структуры на размыв берега, т. е. определять оптимальное место размещения структуры с учетом сохранения эстетической привлекательности побережья.

В рамках проведенного исследования было решено две задачи:

- 1) оценить влияние подводного бара выбранной конфигурации на расход наносов в зависимости от параметров волн;
- 2) проанализировать зависимость расхода наносов от положения бара относительно береговой линии для выбранного волнового режима. Непроницаемый подводный бар в обеих задачах располагался на ровном дне со средним уклоном 0,02 и крупностью прибрежно-морских осадков 0,02 мм.

Поставленные задачи решались методом математического моделирования с помощью модели *Xbeach* [10, 11]. Транспорт взвешенных наносов в модели *Xbeach* моделируется с помощью уравнения адвекции-диффузии [12]. Морфодинамический блок модели для оценки транспорта наносов использует формулу Р. Соулсби и Л. ван Рейна [13] с учетом переноса наносов во влекомом и во взвешенном состояниях.

Обсуждение полученных результатов

При решении первой задачи подводная структура (бар) располагалась на глубине 5,3 м, имела заглубление 2,66 м (параметры даны в средней точке бара) и длину 28 м (рис. 1). В качестве базовых рассматривались волновой режим и параметры бара, при которых происходит наиболее эффективное одновременное уменьшение высоты волны и среднего периода волн [6–9, 14]. Наиболее эффективное одновременное уменьшение высоты волны (на 36%) и среднего периода волн (на 33%) происходит, когда относительная длина структуры $L_{\text{bar}}/L = 0,57$, где L_{bar} – длина бара, м; L – длина волны, м, и относительное заглубление структуры $d_{\text{bar}}/H_s = 0,78$, где d_{bar} – глубина над баром, м; H_s – значительная высота волны, м.

При этих соотношениях параметры полученного волнового режима следующие: $H_s = 3,43$ м; средний период волн $T = 5,61$ с; пиковый период волн $T_p = 7,01$ с; $L = 49,12$ м; крутизна волн $H_{\text{cp}}/L = 0,043$, где H_{cp} – средняя высота волн.

Исследовалось, как влияет подводный бар на транспорт наносов и как транспорт наносов меняется при изменении волновых параметров (высоты и периода волн, табл. 1). Для сравнения были проведены аналогичные тесты без подводной структуры.

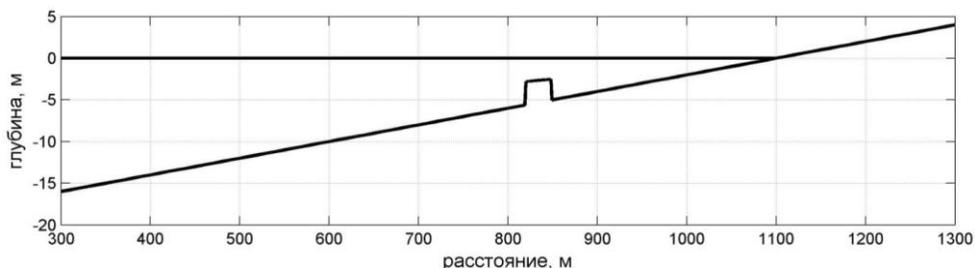


Рис. 1. Положение подводной структуры на профиле дна
Fig. 1. Location of the underwater structure on the bottom profile

Таблица 1
 Table 1

Исследуемые волновые режимы для оценки транспорта наносов при наличии подводного бара
The wave regimes under study for assessing the parameters of the sediment transport at presence of the underwater bar

Параметры волнового режима с постоянным периодом волн/ Parameters of wave mode with constant wave period					
$H, м/H, m$	$H_s, м/H_s, m$	$T, с/T, s$	$T_p, с/T_p, s$	$L, м/L, m$	(H/L)
1,49	2,40				0,030
1,70	2,75				0,035
1,92	3,09				0,039
2,13	3,43	5,61	7,01	49,12	0,043
2,34	3,78				0,048
2,55	4,12				0,052
2,77	4,46				0,056
Параметры волнового режима с постоянной высотой волн/ Parameters of wave mode with constant wave height					
$H_{cp}, м/H_{av}, m$	$H_s, м/H_s, m$	$T, с/T, s$	$T_p, с/T_p, s$	$L, м/L, m$	(H/L)
2,13	3,43	4,77	5,96	35,49	0,060
		5,05	6,31	39,79	0,053
		5,33	6,66	44,33	0,048
		5,61	7,01	49,12	0,043
		5,89	7,36	54,16	0,039
		6,17	7,71	59,44	0,036
		6,45	8,07	64,96	0,033

При моделировании волны воздействовали на профиль дна с подводным баром 30 мин, результаты моделирования выводились один раз в секунду. Оценивался суммарный расход взвешенных наносов ($м^2$) за все время моделирования. Отрицательные значения показателя расхода наносов говорят о суммарном выносе наносов в сторону моря. Чем больше абсолютные значе-

ния этого показателя, тем большее количество наносов выносится за пределы береговой зоны. Нерегулярное волнение задавалось волнением с параметрами спектра JONSWAP – значительной высотой волн (H_s , м), пиковой частотой ($1/T_p$, Гц) и параметром «пиковатости» спектра ($gamma_{jswp} = 3,3$).

Получено, что с увеличением крутизны волн вследствие роста их высоты (период волн один и тот же) расход наносов в сторону моря при наличии подводного бара будет увеличиваться до тех пор, пока крутизна не достигнет значения, близкого к 0,04 (рис. 2, а). Дальнейший рост крутизны свыше этого значения приводит к уменьшению расхода наносов в сторону моря. При этом расход наносов в сторону моря на подводном профиле без бара будет иметь тренд к увеличению с ростом крутизны. При постоянной высоте волн уменьшение их периода (и, соответственно, увеличение крутизны) будет приводить к уменьшению расхода наносов как при наличии подводного бара, так и без него. Для всех исследуемых вариантов показано, что расход наносов при наличии подводного бара всегда ниже, чем без него. Выявлено, что при исследуемом волновом режиме подводный бар снижает перенос материала в сторону моря в два раза и с увеличением крутизны вследствие роста высоты волны эта разница растет.

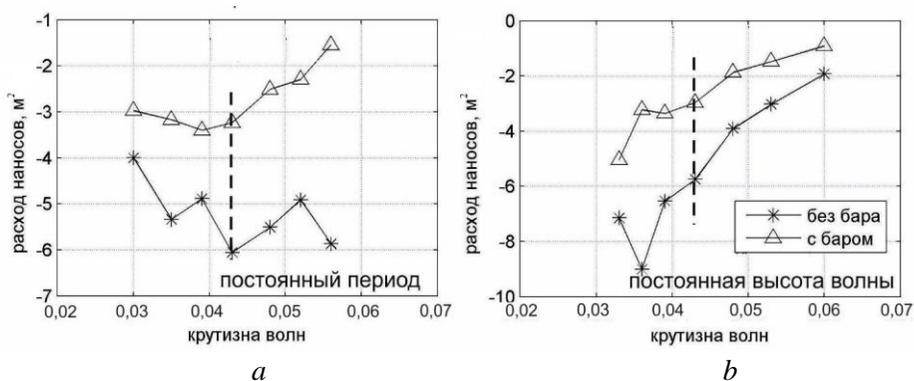


Рис. 2. Интегральные значения суммарного расхода взвешенных наносов за 30 мин воздействия волн при изменении высоты волны (а) и периода (b) относительно базового волнового режима ($H_s = 3,43$ м, $T = 5,61$ с, пунктирная линия)

Fig. 2. Integral values of the suspended sediment total charge in course of a 30 minute long wave impact at variation of the wave height (a) and the period (b) relative to the basic wave regime ($H_s = 3.43$ m, $T = 5.61$ s, dotted line)

При решении второй задачи были рассмотрены 20 различных позиций непроницаемого бара и четыре волновых режима. Постоянными параметрами для всех численных экспериментов были пиковый период волн ($T_p = 7,5$ с и $L = 87,8$ м) и длина бара (28 м). Эти параметры были выбраны как оптимальные с точки зрения получения максимального эффекта трансформации волн над баром для снижения значений среднего периода, что происходит при $L_{bar}/L = 0,31$. Начальные волновые параметры, выбранные для моделирования, приведены в табл. 2.

Различные положения бара характеризовались глубиной над ним (d_{bar}) и расстоянием от бара до берега (x), (рис. 3, а). Для всех позиций бара заглубление бара (d_{bar}) равнялось половине глубины воды в месте расположения

структуры. Относительное заглубление бара определялось как $d_{\text{бар}}/H_s$. Расположение бара относительно уреза оценивалось как отношение расстояния структуры от берега x к длине волны L (x/L). Обрушение волн, вызванное уменьшением глубины воды над баром, определялось согласно индексу обрушения γ по критерию [15]:

$$\gamma = 0,5 + 0,4 \tanh(33S_0),$$

где $S_0 = H_{\text{rms}}/L$ – начальная крутизна волн; H_{rms} – среднеквадратичная высота волн. Обрушение волн, согласно этой зависимости, происходит при $\gamma > 0,8$.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Волновые параметры для численного моделирования
Wave parameters for numerical modeling

Номер режима/ Regime number	$H_s, \text{ м}/H_s, \text{ м}$	$T_p, \text{ с}/T_p, \text{ с}$	$L, \text{ м}/L, \text{ м}$	(H_s/L)
1	1,78	7,5	87,8	0,02
2	2,33			0,027
3	2,88			0,033
4	3,43			0,039

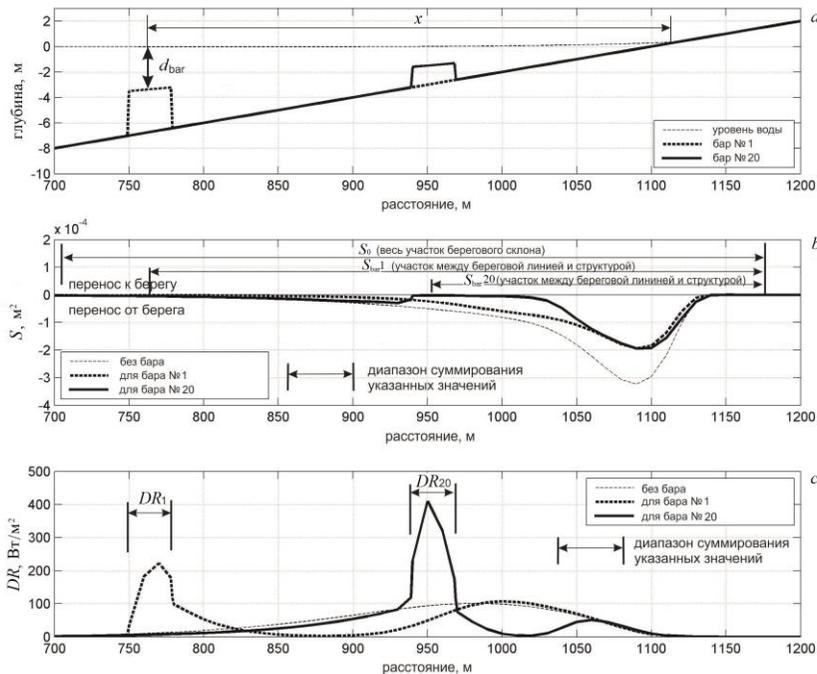


Рис. 3. Рельеф дна (a), суммарные значения транспорта наносов (b) и диссипация энергии роллера (c) для волнового режима 2 при различной позиции бара. DR_i – диссипация энергии роллера при разных позициях бара

Fig. 3. Bottom relief (a), total values of the sediment transport (b) and the roller energy dissipation (c) for the wave regime 2 at different positions of the bar. DR_i is the roller energy dissipation at different positions of the bar

Итоговый транспорт наносов при наличии подводного бара (S_{bar}) был рассчитан как сумма влекомых и взвешенных наносов. Учитывались изменения волновой энергии при трансформации волн над баром на основе изменений значений диссипации энергии роллера (DR_{bar}). На рис. 3, *b* и *c* показан принцип определения суммарного транспорта наносов и значений диссипации энергии роллера в зависимости от расположения бара.

Основной целью исследования было выяснить, как относительное расстояние от берега, относительная глубина над баром и интенсивность диссипации волновой энергии влияют на количество наносов, перемещаемых в береговой зоне, в частности на подводном профиле фиксированной длины.

По данным моделирования получено, что в основном уменьшение транспорта наносов в сторону моря происходит для волн, которые не обрушаются над баром (рис. 4).

Для пологих волн (с начальной крутизной 0,02), распространяющихся над подводным баром, снижение транспорта наносов в сторону моря наблюдается как для обрушающихся, так и для необрушающихся волн. Чем ближе будет располагаться подводный бар к берегу, тем меньше будет транспорт наносов в сторону моря. Для исследуемых случаев при уменьшении удаленности бара от берега (x/L изменяется от 3,8 до 1,7) расход наносов уменьшается почти в два раза. Для крутых волн количество наносов, переносимых в сторону моря, будет больше для обрушающихся волн. При этом чем ближе расположен бар к берегу, тем больше перенос осадков в сторону моря. Для волн с начальной крутизной 0,039 количество наносов, переносимых в сторону моря, будет увеличиваться в случае более близкого положения бара относительно берега вне зависимости от того, происходит ли обрушение волн над баром или нет.

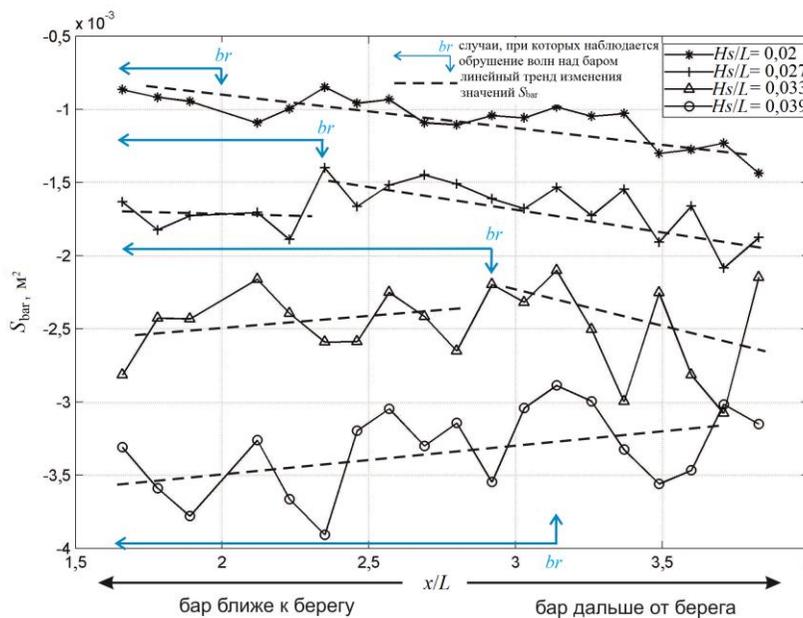


Рис. 4. Зависимость значений суммарного транспорта наносов от относительного расстояния бара от берега (x/L)

Fig. 4. Dependence of the values of the total sediment transport upon the relative distance of the bar from the coast (x/L)

Были введены дополнительные относительные показатели: S_{bar}/S_0 и DR_{bar}/DR_0 . Первый показатель характеризует отношение расхода наносов между баром и береговой линией к расходу наносов на профиле без подводного бара. Второй показатель является отношением диссипации энергии над баром к суммарной диссипации энергии над профилем без подводного бара.

Анализ интенсивности диссипации волновой энергии показал, что чем больше расходуется волновой энергии над баром (показатель DR_{bar}/DR_0 имеет большие значения), тем меньше относительные значения транспорта наносов (меньшие значения S_{bar}/S_0 говорят о положительном влиянии бара на транспорт наносов, т. е. об уменьшении расхода (рис. 5, а)). Таким образом, независимо от начальной крутизны волн эффективность заглабленного бара для уменьшения расхода наносов в сторону моря также зависит от относительной доли волновой энергии, которая диссипирует при прохождении волн над подводным баром.

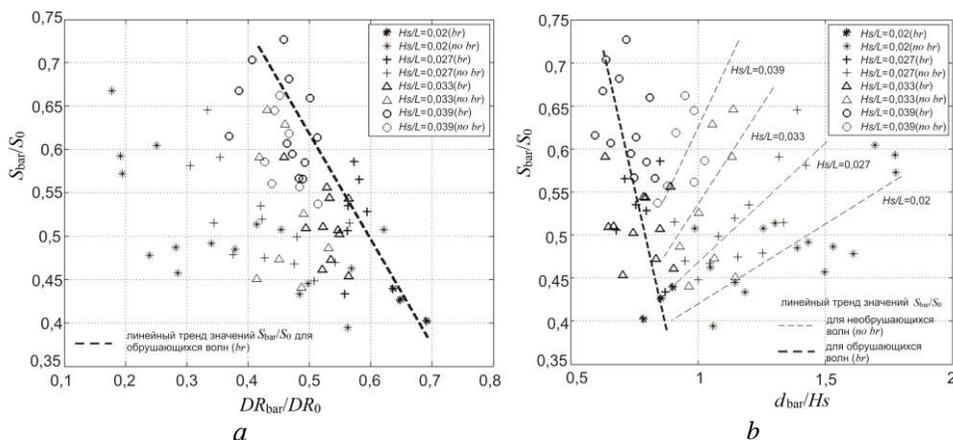


Рис. 5. Зависимость относительных значений транспорта наносов от относительной диссипации энергии роллера (а) и относительного заглабления бара (b). Индекс легенды «br» относится к случаям с обрушением волн над баром; индекс легенды «no br» относится к случаям без обрушения волн над баром

Fig. 5. Dependence of the relative values of the sediment transport upon the roller energy relative dissipation (a) and the bar relative deepening (b). Index of the «br» legend is referred to the cases of wave breaking over the bar; index of the «no br» legend is referred to the cases of no wave breaking over the bar

Интенсивность диссипации волновой энергии, в свою очередь, зависит от относительного заглабления (d_{bar}/H_s). Для всех значений крутизны волн минимальное значение расхода наносов наблюдается при $d_{\text{bar}}/H_s \sim 0,8-0,9$, что соответствует волнам на грани обрушения (рис. 5, b). Для необрушающихся волн значение расхода наносов, согласно полученному тренду значений S_{bar}/S_0 , находится в линейной зависимости от относительной глубины бара и крутизны волн. Контроль параметров транспорта наносов (в частности, расхода) и прогноз его значений возможен, если волны распространяются над баром без обрушения.

Выводы

1. Выявлено, что подводная структура в виде непроницаемого бара способствует снижению расхода наносов в сторону моря. Потери и перераспределение волновой энергии при прохождении волн над ним приводят к снижению интенсивности переноса осадков и результирующего транспорта наносов в приустьевой зоне.

2. При расположении подводного бара ближе к берегу транспорт наносов в сторону моря снижается для пологих волн и увеличивается для крутых. Если бар расположен так, что волны не обрушаются над ним, то чем ближе бар находится к берегу, тем меньше расход наносов в сторону моря.

3. Минимизация расхода наносов в сторону моря возможна в том случае, если подводный бар установлен так, чтобы волны над ним проходили на грани обрушения, но не обрушались. При выполнении этого условия, расположение бара является оптимальным с точки зрения сохранения наносов в береговой зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ranasinghe R., Turner I. L.* Shoreline response to submerged structures: A review // *Coastal Engineering*. 2006. Vol. 53, iss. 1. P. 65–79. doi:10.1016/j.coastaleng.2005.08.003
2. Drifting characteristics of littoral sand around submerged breakwater (field survey on Niigata West Coast) / Н. Funakoshi [et al.] // *Proceedings of the International conference on hydro-technical engineering for port and harbor construction “HYDRO-PORT '94”*, October 19–21, 1994, Yokosuka, Japan. Yokosuka, Japan : Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, 1994. Vol. 2. P. 1157–1178.
3. *Hirose N., Watanuki A., Saito M.* New type units for artificial reef development of eco-friendly artificial reefs and the effectiveness thereof // *30th PIANC-AIPCN Congress 2002* / Ed. R. J. Cox. Sydney, N. S. W. : Institution of Engineers, 2002. P. 886–899. URL: <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=693769661061571;res=IELENG> (дата обращения: 26.09.2018).
4. *Meer J. M. van der, Regeling E., Waal J. P. de.* Wave transmission: Spectral changes and its effects on run-up and overtopping // *Coastal Engineering 2000* / Ed. B. L. Edge. Sydney : ASCE, 2000. Vol. 1. P. 2156–2168. doi:10.1061/40549(276)168
5. *Carevic D., Loncar G., Prsic M.* Transformation of statistical and spectral wave periods crossing a smooth low-crested structure // *Oceanologia*. 2012. Vol. 54, iss. 1. P. 39–58. doi:10.5697/oc.54-1.039
6. *Коваленко А. Н., Корзинин Д. В.* Трансформация волн над подводным волноломом со значительным заглублением // *Транспортное строительство*. 2015. № 10. С. 2–6.
7. *Saprykina Y., Kuznetsov S., Korzinin D.* Nonlinear transformation of waves above submerged structures // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 116. P. 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.281>
8. *Korzinin D.* Parametrization of wave transformation above submerged bar based on physical and numerical tests // *Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab16)*, Ottawa, Canada, 10–13 May, 2016. Ottawa : University of Ottawa, 2016. URL: <http://rdio.rdc.uottawa.ca/publications/coastlab16/coastlab27.pdf> (дата обращения: 26.09.2018).
9. *Корзинин Д. В.* Трансформация волн над погруженным баром по данным физического и математического моделирования // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : ЭКОСИ- Гидрофизика, 2017. Вып. 4. С. 14–21.
10. *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands* / D. Roelvink [et al.] // *Coastal Engineering*. 2009. Vol. 56, iss. 11–12. P. 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>

11. *Grunnet N. M., Walstra D-J. R., Ruessink B. G.* Process-based modelling of a shoreface nourishment // *Coastal Engineering*. 2004. Vol. 51, iss. 7. P. 581–607.
12. *Galappatti G., Vreugdenhil C. B.* A depth-integrated model for suspended transport // *Journal of Hydraulic Research*. 1985. Vol. 23, iss. 4. P. 359–377. doi:10.1080/00221688509499345
13. *Soulsby R. L.* Dynamics of marine sands: A manual for practical applications. London : Thomas Telford, 1997. 249 p.
14. *Сапрыкина Я. В.* Трансформация волн над особенностями подводного рельефа дна в применении к методам защиты берегов. М. : Onebook.ru, 2018. 164 с.
15. *Battjes J. A., Stive M. J. F.* Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves // *Journal of Geophysical Research*. 1985. Vol. 90, iss. C5. P. 9159–9167. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p09159>

Об авторах:

Сапрыкина Яна Владимировна, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0357-0773**, **ResearcherID: F-7556-2014**, **Scopus AuthorID: 6507942096**, saprykina@ocean.ru

Корзинин Дмитрий Викторович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ResearcherID: A-5093-2017**, **Scopus Author ID: 56829564800**