

УДК 551.435.3(262.5)

© 2019 г. О.А. КУЗНЕЦОВА^{1, 2,*}, Я.В. САПРЫКИНА^{1,**}**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПЕСЧАНОГО ПЛЯЖА
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛН С ПОДВОДНЫМ ВАЛОМ**¹ *Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*² *Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова Росгидромета,
Москва, Россия***E-mail: olga.ku-ocean@yandex.ru, **E-mail: saprykina@ocean.ru*

Поступила в редакцию 01.11.2016

После доработки 20.06.2017

Принята к печати 18.12.2018

С помощью математического моделирования исследовано влияние положения подводного вала на морфодинамику песчаного пляжа бесприливного моря в масштабе времени до 20 ч. За основу был выбран рельеф болгарского побережья Черного моря в районе поселка Шкорпиловцы. Результаты моделирования были верифицированы по данным натурных наблюдений. Обнаружено, что наибольшее отступление уреза наблюдается в первый час. Для выбранного режима волнения (высота значительных волн 1.5 м, период — 10.5 с) через 6 часов происходит формирование равновесного профиля, содержащего подводную террасу с уклоном, близким к теоретическому профилю равновесия Дина. Показано, что положение подводного вала влияет на интенсивность отступления уреза. Наименьшее отступление берега будет при положении вала на расстоянии порядка 0.7–0.8 от длины волны, соответствующей периоду пика спектра волн, определяемому по дисперсионному соотношению линейной теории волн на глубокой воде. Наибольшее отступление уреза будет наблюдаться при положении вала на расстояниях, близких к половине длины волн. Установлено, что отступление уреза зависит от высоты инфрагравитационных волн и среднего периода волнения: чем меньше средний период и больше высота инфрагравитационных волн вблизи берега, тем меньше отступление уреза. Расстояние выноса наносов в море находится в прямой зависимости от высоты значительных волн у берега.

Ключевые слова: профиль равновесия, береговая зона, волновые деформации, моделирование, “модель xBeach”, трансформация волн.

<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019357-67>

**MODELING THE DYNAMICS OF A SAND BEACH GOVERNED
BY THE WAVE AND UNDERWATER BAR INTERACTION**O.A. KUZNETSOVA^{1, 2,*}, Ya.V. SAPRYKINA^{1,**}¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*² *Zubov Oceanographic Institute of RosHydromet, Moscow, Russia***E-mail: olga.ku-ocean@yandex.ru, **E-mail: saprykina@ocean.ru*

Received 01.11.2016

Revised 20.06.2017

Accepted 18.12.2018

Effect of bar position on underwater profile of sandy beach was studied at the timescale of one storm using the xBeach numerical model. Beach profiles were extracted from the bathymetry of the Shkorpilovtsy beach (the Bulgarian coast of the Black Sea). Computed results were verified by field measurements. The largest shoreline retreat occurred in the first hour of a storm. For the chosen wave regime (largest wave height 1.5 m, wave period 10.5 s), an equilibrium profile was formed after 6 hours. The resulting profile contained an underwater terrace with the slope close to that of the theoretical equilibrium profile. It was shown that the position of the underwater bar affects the shoreline retreat rate. The smallest and the largest shore retreat occur if bar crest is located at a distance about 0.7–0.8 and 0.5 of the deep water wavelength, correspondingly. It was found that the shoreline retreat depends on the height of infragravity waves and mean wave period: the smaller mean wave period and the higher infragravity waves near the coast, the smaller is the retreat of the coastal line. Distance of seaward sediment transfer is directly relates to the height of large waves near the shore.

Keywords: equilibrium profile, coastal zone, xBeach, wave transformation, underwater bar.

Введение

Около 10% берегов Мирового океана осложнены подвижными аккумулятивными донными формами — подводными валами [1]. Они могут быть единичными, но часто наблюдаются системы валов (≥ 5). Для зон аккумуляции на лучах конвергенции прибрежных потоков вещества и энергии характерен широкий пляж и развитая система валов и межваловых ложбин. В областях дивергенции и зарождения потока или дефицита наносов — узкий пляж и 1–2 подводных вала [2].

Существует несколько теорий, объясняющих существование и эволюцию подводных валов [3, 4]. Первая группа теорий предполагает, что подводные валы образуются в зоне обрушения волн в результате градиента расхода наносов, формируемого волновым переносом, направленным к берегу, и противотечением, направленным в сторону моря [5–8]. Вторая группа трактует возникновение подводных валов действием инфрагравитационных волн, которые при отражении от берега могут образовывать стоячие волны и способствовать накоплению наносов в местах максимума их амплитуды. Валы, согласно гипотезе К. Виджнберга и А. Крууна [9], возникают в результате взаимоподстройки волн и рельефа в процессе “самоорганизации” морфологии береговой зоны. Однако детали такого механизма не раскрыты.

Формирование подводных валов может продолжаться от нескольких дней до нескольких месяцев [10]. При постоянном объеме наносов на подводном склоне валы устойчивы, они изменяют свое положение и размеры в зависимости от чередования бурных и спокойных периодов [11]. Лабораторные исследования и натурные наблюдения показывают: при затухании волн и уменьшении нагона подводный вал смещается в сторону берега. При усилении волнения вал смещается в море. В то же время при частой смене интенсивности волнения подводный вал может оставаться практически на одном месте и рассматриваться как стабильный [12].

Валы влияют на трансформацию волн, что сказывается на поперечном перераспределении наносов и изменении рельефа береговой зоны. Особенности трансформации волн у песчаных берегов и связанные с этим особенности морфодинамики достаточно подробно исследованы [12, 14–16]. Однако влияние положения подводного вала на интенсивность отступания берега остается невыясненным.

Используемые в современной практике берегозащиты подводные волноломы, имитирующие по форме подводные валы или рифы, устанавливаются для снижения волновой нагрузки на берег и защиты от абразии [17]. Уменьшение энергии волн над подводным волноломом происходит как за счет их обрушения над конструкцией, так и из-за сокращения среднего их периода при нелинейно дисперсионной трансформации волн над неровностью дна [13]. При установке таких сооружений для достижения максимальной эффективности необходимо правильно подобрать конфигурацию и расположение конструкций.

Цель работы — методами математического моделирования исследовать влияние расположения естественного подводного вала на трансформацию волн и изменение рельефа прибрежного мелководья неприливного моря для разработки рекомендаций по установке берегозащитных подводных сооружений.

Методы

Для задания начальных и граничных условий модели, а также верификации результатов моделирования использовались материалы полевых исследований, проведенных на полигоне Института океанологии Болгарской Академии Наук (пос. Шкорпиловцы, Черное море, Болгария). Берег восточной экспозиции практически прямолинейен. Вдоль него развиты подводные валы серповидной формы (рис. 1). По данным мно-

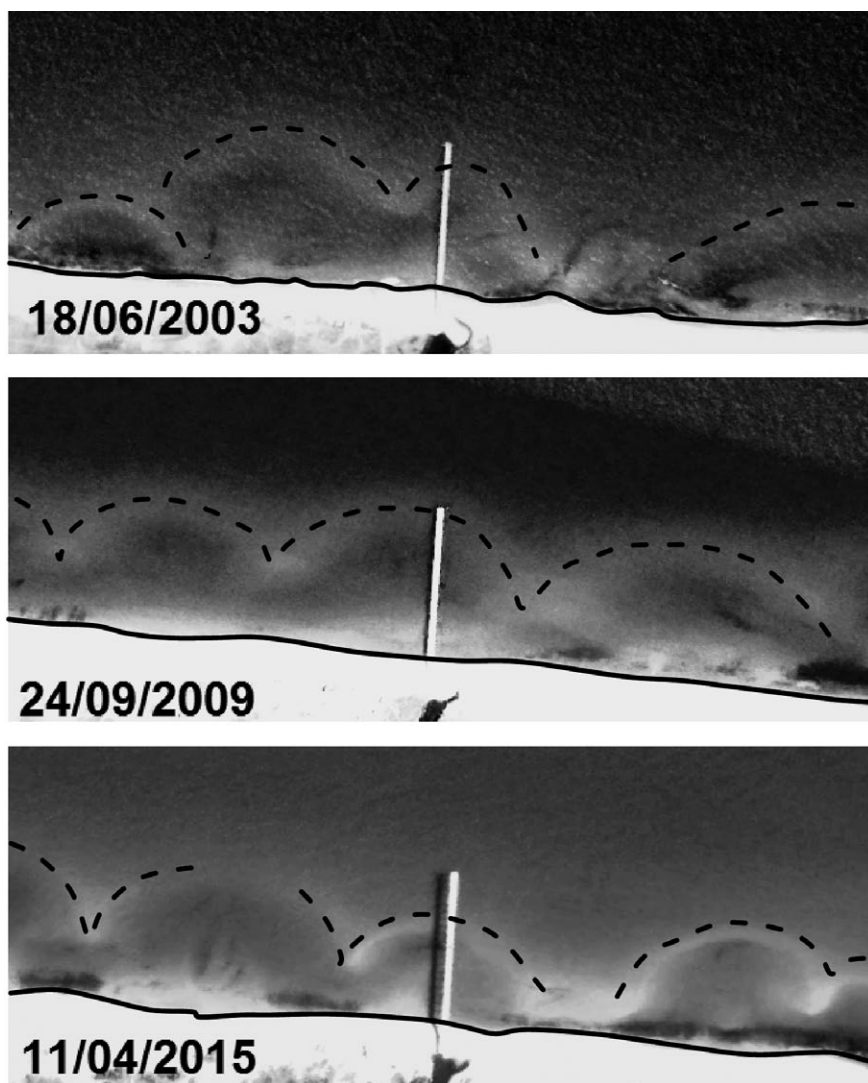


Рис. 1. Космические снимки серповидных подводных валов на полигоне Шкорпиловцы (Image © 2017 Digital Globe). Пунктирная линия — гребень вала, сплошная — урез воды

голетних наблюдений, они перемещаются в зависимости от изменения волновых условий, но в целом сохраняются как феномен, характерный для данного берега. Подводный береговой склон сложен разноразмерными кварцевыми песками: до глубины 2.5 м грубозернистыми и среднеразмерными (95%), а глубже — мелкозернистыми.

Натурный эксперимент проводился в сентябре 2007 г. Он включал синхронные измерения волнения и морфодинамики вдоль научно-исследовательской эстакады до глубины 4.5–5 м, а также топографическую и батиметрическую съемки пляжа и прибрежной зоны. В период эксперимента высота значительных волн (H_s — средняя высота одной трети самых высоких волн) в дистальной части эстакады изменялась в пределах 0.6–1.8 м, период спектрального пика волн $T_p = 4–9$ с. Съемка рельефа проводилась на поперечных к берегу профилях, заложенных через каждые 100 м справа и слева от эстакады. Всего было измерено 12 профилей, каждый из которых был осложнен подводным валом.

Для моделирования морфодинамики пляжа и подводного склона использовалась модель xBeach (<https://oss.deltares.nl/web/xbeach>) с негидростатическим гидродинамическим модулем. Она способна воспроизводить гидродинамические процессы береговой зоны и соответствующую им морфодинамику рельефа [18]. Для унификации рельефа в одномерной версии модели на основе данных батиметрической съемки построены 6 поперечных профилей (рис. 2, табл. 1). Первый (контрольный) профиль 0

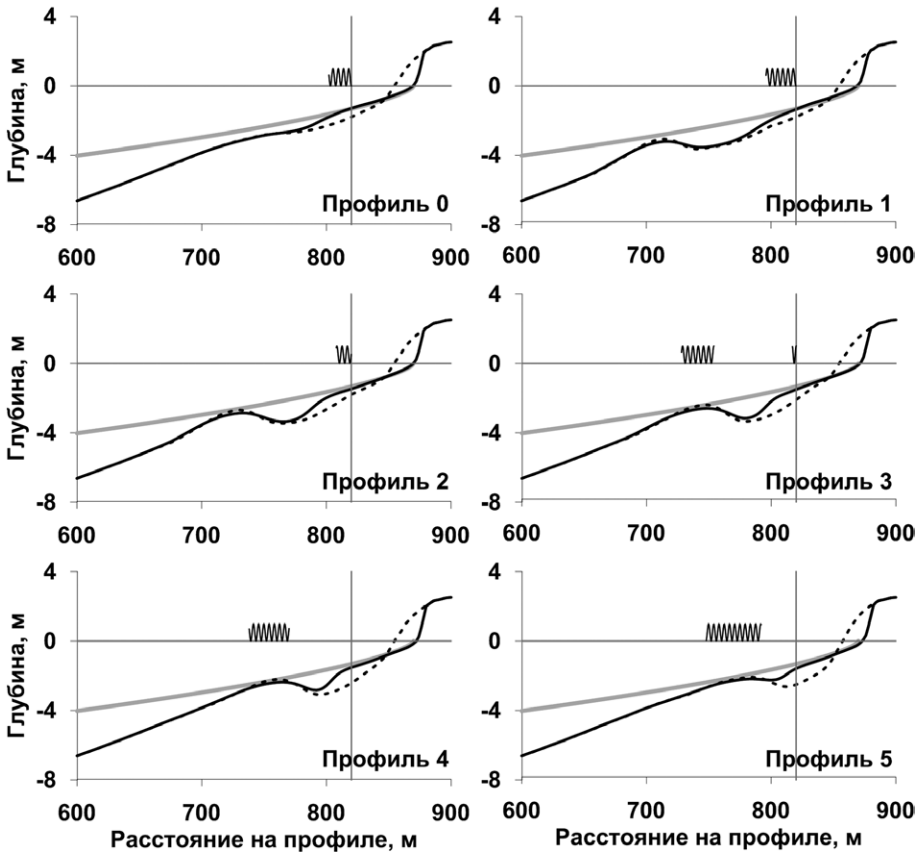


Рис. 2. Исходные (пунктирная линия) и результирующие (сплошная черная линия) профили после 20 ч. волнового воздействия с параметрами 1.5 м, 10.5 с; зигзагообразной линией показана зона обрушения волн, вертикальная линия — береговая граница области анализа хронограмм волнения. Профиль Дина для наносов крупностью 0.2 мм — серая сплошная линия

Начальные параметры модельных профилей

Параметр, м	Профиль					
	0	1	2	3	4	5
Глубина моря над вершиной вала	нет	-3.07	-2.68	-2.38	-2.20	-2.08
Положение вершины вала на модельном профиле	нет	714	730	748	762	784
Расстояние от уреза до вершины вала (расстояние до уреза (X)/длина волны на глубокой воде (L))	нет	141 (0.82)	125 (0.72)	107 (0.62)	93 (0.54)	73 (0.42)

представляет собой среднее положение дна, вычисленное по всем профилям. Средний его уклон $I = 0.022$, он несколько увеличивается в верхней части склона и уменьшается на $h = 2-3$ м. Остальные 5 профилей осложнены подводным валом с предвальной ложбиной, расположенным на разном расстоянии от берега.

Наиболее симметричный подводный вал из выборки натуральных измерений накладывался на контрольный профиль таким образом, чтобы имитировать положение ветви серповидного вала (который подходит к берегу в районе исследовательской эстакады). Наложение фиксированной формы вала на средний профиль позволило избежать существенных различий в надводном рельефе и сохранить сравнительно одинаковую выраженность вала и предвальной ложбины.

При моделировании крупность наносов была условно принята за 0.2 мм (мелкозернистый песок) для всего профиля.

Модель *xBeach* на каждом полученном профиле применялась в двух режимах расчета: 1) для волнения при стабильном профиле дна и 2) для деформаций рельефа. Волны на внешней границе расчетной области (≈ 860 м от берега, глубина 19 м) задавались в виде синтетического спектра JONSWAP [19] с параметром “пиковатости” $\gamma = 3.3$, высотой значительных волн $H_s = 1.5$ м и периодом спектрального пика $T_p = 10.5$ с. Угол рассеяния волновой энергии составлял 2.5° . Волнение с такими параметрами в Азово-Черноморском регионе относится к опасным гидрометеорологическим явлениям [20], а период $T_p = 10.5$ с соответствует штормам повторяемостью один раз в 25 лет [21].

В результате расчета волнения получены хронограммы возвышений свободной поверхности (волны) в выбранных точках профиля с дискретностью 5 Гц. По хронограммам строились спектры и исследовалась эволюция следующих параметров волн [23].

1. Высоты значительных волн, рассчитанные по всему спектру

$$H_s = 4 \cdot \sqrt{m_0} \text{ [м]},$$

(где $m_0 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega$, $S(\omega)$ — спектр, ω — частота)

и с фильтрацией по частоте: 0–0.05 Гц — инфрагравитационные волны (H_{IGW} , низкочастотные колебания — образуются как результат групповой структуры нерегулярного ветрового волнения или вследствие обрушения), 0.05–0.15 Гц — волны основной частоты (H_{GW1}).

$$2. \text{ Средний период волн } T_{mean} = \frac{\int_0^\infty S(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \omega \cdot S(\omega) d\omega}.$$

3. Асимметрия волн относительно вертикальной $As = \langle \zeta_H^3 \rangle / \sigma^3$

и горизонтальной осей $Sk = \langle \zeta^3 \rangle / \sigma^3$,

Основные изменения модельных профилей после 20 часов волнового воздействия

Параметр, м	Профиль					
	0	1	2	3	4	5
Глубина моря над вершиной вала	нет	-3.21	-2.86	-2.59	-2.37	-2.18
Расстояние от уреза до вершины вала	нет	139	121	107	95	73
Отступление уреза	14.8	14.3	15.3	16.7	17.6	15.6
Средняя мощность аккумуляции	0.34	0.29	0.30	0.41	0.50	0.61
Расстояние выноса наносов в море (x) (Расстояние выноса наносов (x)/ длина волны на глубокой воде (L))	76 (0.44)	86 (0.50)	98 (0.57)	82 (0.48)	70 (0.41)	54 (0.31)

где скобки $\langle \rangle$ — оператор осреднения, ζ — отклонение свободной поверхности, σ — стандартное отклонение свободной поверхности, ζ_H — преобразование Гилберта.

4. Длина волны L — определялась по дисперсионному соотношению линейной теории волн для периода спектрального пика.

Эволюция волновых параметров рассматривалась на участке профиля с глубинами от 6 до 2 м, что соответствует отметкам 620–820 м на модельном профиле (рис. 2).

В режиме воспроизведения деформаций рельефа модель имитировала 20-часовое волновое воздействие. Результаты расчета деформаций рельефа выдавались один раз в час. На основе полученных данных оценивалось отступление уреза воды и изменение рельефа дна. На рис. 2 показаны исходный и измененный рельеф, полученный в результате моделирования после 20 часов воздействия волн. Результирующие параметры деформаций представлены в табл. 2.

Результаты и обсуждение

На всех профилях наблюдался размыв в прирезовой зоне, вынос наносов в море и аккумуляция на глубине более 1 м (рис. 3). Однако скорость абразии и аккумуляции на профилях с разным положением вала (и без него) была различна.

В целом, с приближением вала к берегу (и уменьшением глубины), размыв уреза

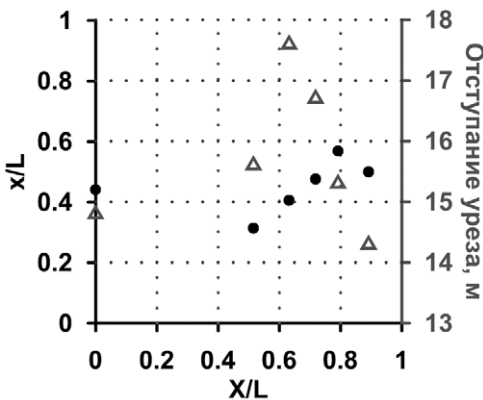


Рис. 3. Величина отступающего уреза (треугольники) и относительное расстояние выноса наносов, x/L (кружочки) в зависимости от относительного начального положения вала (X/L)

увеличивался, а слой наносов мористее на профиле уменьшался; но расстояние выноса наносов в сторону моря при этом возрастало (рис. 3, табл. 2). Отступление уреза на профиле с наиболее удаленным от берега положением вала (0.82 от длины волны) существенно меньше, чем на профиле, где вал расположен ближе (0.42 от длины волны). Профиль, где вал расположен на 0.54 от длины волны, имел максимальную величину отступления уреза, но расстояние выноса наносов было такое же, как и на профиле, где вал находится на самом дальнем расстоянии от берега. Ни на одном профиле пляжевый материал не выносился далее подводного вала.

По сравнению с контрольным профилем (без вала) обнаружено: а) профиль

с самым дальним расположением вала будет уменьшать отступление уреза; б) профиль с положением менее половины длины волны наилучшим образом “работает”, как барьер против выноса пляжевого материала в море.

Такое расположение вала целесообразно использовать в целях защиты пляжей от размыва (например, при создании искусственных подводных валов). Установка подводного вала на расстояниях порядка $1/2 \cdot L$ от берега будет давать с этой точки зрения худшие результаты. По сравнению с контрольным профилем без вала, наличие подводного вала

на некоторых относительных расстояниях от берега может приводить к интенсификации абразии. Таким образом, при наличии подводного вала, расположенного под углом к берегу (вершина вала находится на разных расстояниях от уреза) возможно неравномерное отступление уреза и формирование пляжевых фестонов.

Под воздействием волн происходила деформация и самого подводного вала: снижение и отступление гребня на 2–4 м в сторону моря (профили 1, 2 и 4). На профилях 3–5 прибрежный склон подводного вала становился менее крутым за счет заполнения предвальной ложбины. Отступление его вершины в сторону моря и изменение асимметрии согласуются, в целом, с данными натурных наблюдений [23].

Размыв линии уреза и трансформация рельефа в модели неоднородны во времени. Максимальная скорость отступления (4.5–6.5 м/ч, рис. 4) для всех профилей отмечается в первый час волнового воздействия. Затем абразия уменьшается, а после 6 часов профиль пляжа адаптируется к заданному режиму волнения и принимает относительно равновесное состояние, при котором скорость отступления уреза для всех профилей ≈ 0.5 м/ч. Независимо от исходного рельефа подводного склона на всех профилях формируется подводная терраса, представляющая равновесный профиль, близкий к теоретическому [24] (рис. 2):

$$h = A \cdot y^{2/3},$$

где для наносов размером 0.2 мм $A = 0.1$ [12].

Формирование подобного подводного профиля с террасой наблюдалось нами и в натурном эксперименте “Шкорпиловцы 2007” (H_S до 1.7 м).

Разная степень размыва берега в первый час может быть объяснена различиями в трансформации волн над профилем. Отношение высоты инфрагравитационных волн и значительной высоты волн мористее и бережнее вала (координаты на модельном профиле 620 и 820 м) отличается для разных профилей на 20%, а средний период на 10% (рис. 5а–в).

Экспериментально установлен ряд закономерностей. На отступление берега влияет средний период волн и величина инфрагравитационных волн. Чем меньше средний период и больше высота инфрагравитационных волн, тем меньше отступление уреза. Такое изменение параметров волнения происходит на профиле с валом, наиболее удаленном от уреза (0.82 от длины волны).

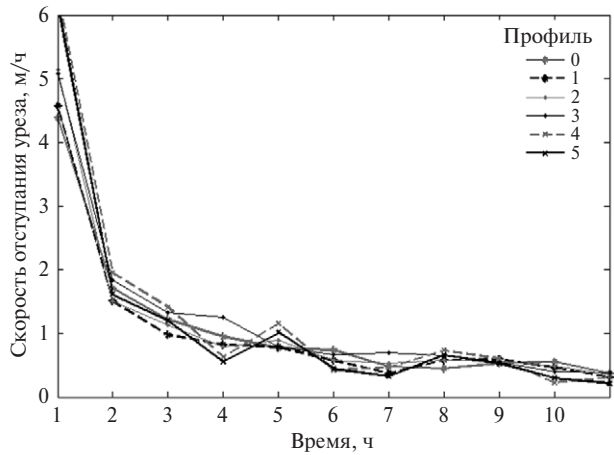


Рис. 4. Скорость отступления береговой линии (м/ч) на профилях

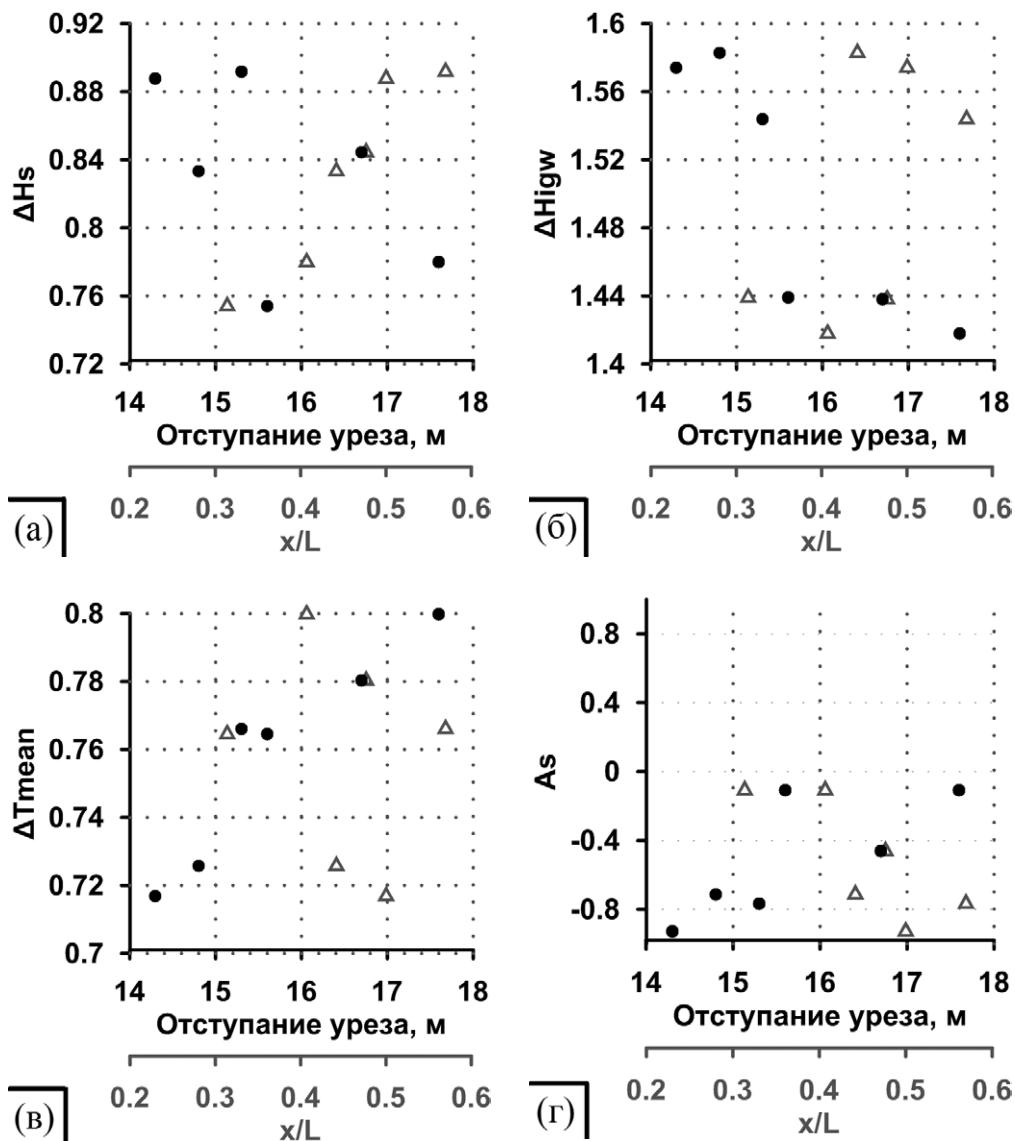


Рис. 5. Зависимость отступления уреза (точки) и относительного расстояния выноса наносов, x/L (треугольники) от относительного изменения параметров волнения при трансформации волн в береговой зоне: (а) — значительной высоты волн, (б) — значительной высоты инфрагравитационных волн, (в) — среднего периода волнения, (г) — асимметрии волн (A_s) относительно вертикальной оси

Вынос наносов в море зависит от значительной высоты волн основной частоты H_{GW1} : чем больше высота, тем дальше выносятся материал.

Наличие стабильного подводного вала меняет симметрию волн. Для всех профилей симметрия волн относительно горизонтальной оси бережного вала (координата на профиле 820 м) остается практически одинаковой (~ 1.6). Асимметрия волн относительно вертикальной оси изменяется более заметно. Согласно модельным данным, чем более

асимметричные волны подходят к берегу, тем меньше размыв пляжа (рис. 5 г). Наиболее асимметричные волны бережнее вала наблюдаются на профилях, где первое обрушение волн происходит между урезом и валом: например, на профилях с его дальним расположением (профили 1 и 2), а также на профиле без вала (рис. 2).

При расположении вала ближе к берегу и уменьшении глубины над ним, обрушение волн происходит как на вершине вала, так и вблизи берега. Над валом это наблюдается дальше от берега, чем на профилях 0–2, а второе обрушение смещается ближе к урезу. Наличие двух точек обрушения приводит к существенно большему отступанию линии уреза. Исключение составляет профиль, где вал расположен на самом близком расстоянии к урезу (профиль 5). Потери песка в море, как и отступление уреза при этом несколько уменьшаются.

Моделированием определено: наилучшее, с точки зрения защиты линии уреза от размыва, расположение вала на профиле 1. Однако вал на профиле 5 наилучшим образом “удерживает” мелкозернистый песок вблизи берега.

Выводы

В целом, численное моделирование показало: положение подводного вала влияет на отступление линии уреза и на расстояние выноса наносов в море.

Отступление уреза минимально при расположении вала на расстоянии 0.7–0.8 от длины подходящих волн на глубокой воде. При таком положении подводного вала размыв меньше, чем на профиле без вала.

Подводный вал является естественным барьером, задерживающим наносы в береговой зоне. В модели материал, смытый из приурезовой части пляжа, не выносится далее вала. При расположении вала на расстоянии менее половины длины подходящих волн на глубокой воде, он будет максимально эффективно удерживать песок вблизи берега.

Наличие подводного вала на расстоянии около половины длины подходящих волн может приводить к большему отступанию линии уреза.

Если вал расположен под углом к берегу, то отступление уреза при нормальном подходе волн к берегу будет неравномерным (могут возникать пляжевое фестоны).

Наибольшая разница в скорости отступления берега, связанная с положением подводного вала, наблюдается в первый час волнового воздействия. Через 6 часов формируется профиль равновесия, близкий к теоретическому профилю Дина. Скорость абразии берега существенно замедляется и становится одинаковой для всех профилей.

Трансформация волн над профилем определяет морфодинамику береговой зоны. Установлена обратная зависимость между отступанием уреза и высотой инфрагравитационных волн вблизи берега. Дальность выноса наносов в море находится в прямой зависимости от высоты значительных волн. Уменьшение среднего периода волнения, связанное с ростом высших гармоник при прохождении волн над валом, также уменьшает скорость отступления линии уреза.

При трансформации волн над профилями с подводными валами, находящимися на разном расстоянии от берега, по-разному меняется и асимметрия волн относительно вертикальной оси. По данным моделирования, чем больше асимметрия волн после прохождения ими вала, тем меньшее влияние на отступление берега они будут оказывать.

Рекомендации: в целях защиты берега от размыва целесообразно устанавливать подводные конструкции, имитирующие подводные валы, на расстоянии, близком к 0.8 от длины подходящих волн в открытом море.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 0149-2019-0005) и при частичной поддержке РФФИ (проекты № 16-35-00542, 18-55-45026).

Acknowledgments. Present paper is a part of the state assignment (subject No. 0149-2019-0005), financially supported by the RFBR (projects No. 16-35-00542, 18-55-4502).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонтьев О. К.* Морская геология (Основы геологии и геоморфологии Мирового океана). М.: Высш. образование, 1982. 344 с.
2. *Болдырев В. Л.* Комплекс признаков, характеризующих изменение емкости вдольберегового потока песчаных наносов // Развитие морских берегов в условиях колебательных движений земной коры. Таллин: Валгус, 1966. 242 с.
3. *Masselink G., Austin M., Scott T., Poate T., and Russell P.* Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, micro-tidal beach // *Geomorphology*. 2014. Vol. 226. P. 76-93.
4. *Леонтьев И. О.* Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. LAP Lambert Academic Publishing. 2014. 260 с.
5. *Зенкович В. П.* Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
6. *Долотов Ю. С.* Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления. М.: Наука, 1989. 269 с.
7. *Ингл Дж.* Движение пляжевых песков (исследования с помощью люминесцентных индикаторов). Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1971. 225 с.
8. *Кутырев Э. И.* Условия образования и интерпретации косой слоистости. Л.: Недра, 1968. 128 с.
9. *Wijnberg K. M. and Kroon A.* Barred beaches // *Geomorphology*. 2002. Vol. 48. P. 103-120.
10. *Ruessink B. G., Wijnberg K. M., Holman R. A., Kuriyama Y., and van Enckevort I. M. J.* Intersite comparison of interannual nearshore bar behaviour // *Journal of geophysical research*. 2003. Vol. 108. No. C8. 3249. DOI:10.1029/2002JC001505
11. *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1. 187 с.
12. *Grasso F., Michallet H., Certain R., and Barthélemy E.* Experimental flume simulation of sandbar dynamics // *Journal of coastal research*. 2009. SI 56. Vol. I. P. 54-58.
13. *Saprykina Y., Kuznetsov S., and Korzjinin D.* Nonlinear transformation of waves above submerged structures // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 116 (1). P. 187-194.
14. *Cheng J., Wang P., and Smith E. R.* Hydrodynamic conditions associated with an onshore migrating and stable sandbar // *Journal of Coastal Research*. 2016. Vol. 32. I. 1. P. 153-163.
15. *Saleh Salem A., Jarno-Druaux A., and Marin F.* Physical modelling of cross-shore beach morphodynamics under waves and tides // *Journal of Coastal Research*. 2011. SI 57. P. 139-143.
16. *Леонтьев И. О.* Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
17. Проектирование морских берегозащитных сооружений. СП 32-103-97. М.: Корпорация «ТРАНССТРОЙ», 1998.
18. *Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R., and Lescinski J.* Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*. 2009. Vol. 56 (11-12). P. 1133-1152.
19. *Hasselmann K., Barnett T. P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D. E., Enke K., Ewing J. A., Gienapp H., Hasselmann D. E., Kruseman P., Meerburg A., Miller P., Olbers D. J., Richter K., Sell W., and Walden H.* Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, A (8)*. 1973. No. 12. P. 95.
20. *Наумова В. А., Евстигнеев М. П., Евстигнеев В. П., Любарец Е. П.* Ветро-волновые условия Азово-Черноморского побережья Украины // *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2010. В. 259. С. 263-283.
21. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Ред. Лопатухин Л. И. и др. СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2006. 452 с.
22. *Coastal Engineering Manual*. U. S. Army Corps of Engineers. 2002. Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D. C. (in 6 volumes).
23. *Кузнецова О. А., Сапрыкина Я. В., Трифонова Е. В.* Экспериментальные исследования влияния волнения на деформации рельефа дна береговой зоны // *Процессы в геосредах*. 2015. № 2 (2). С. 66-74.
24. *Dean R. G.* Equilibrium beach profiles: characteristics and applications // *Journal of Coastal Research*. 7. P. 53-84.

REFERENCES

1. Leont'ev O. K. *Morskaja geologija (Osnovy geologii i geomorfologii Mirovogo okeana)* (Marine Geology (Fundamentals of Geology and Geomorphology of the World Ocean)). Moscow: Vysshee obrazovanie (Publ.), 1982. 344 p.
2. Boldyrev V. L. A complex of features characterizing the change in the capacity of the alongshore sand sediment flow, in *Razvitie morskikh beregov v usloviyah kolebatel'nykh dvizhenij zemnoj kory* (The development of the coast in the conditions of oscillatory movements of the earth's crust.). Tallin: Valgus, (Publ.) 1966. 242 p.
3. Masselink G., Austin M., Scott T., Poate T., and Russell P. Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, micro-tidal beach. *Geomorphology*. 2014. Vol. 226. P. 76-93.
4. Leont'ev I. O. *Morfodinamicheskie processy v beregovoj zone morja* (Morphodynamics of sea coastal zone). LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 260 p.
5. Zenkovich V. P. *Osnovy uchenija o razvittii morskikh beregov* (Fundamentals of seashores development). Moskva: Izd-vo AN SSSR (Publ.), 1962. 710 p.
6. Dolotov Ju. S. *Dinamicheskie obstanovki pribrezhno-morskogo rel'efoobrazovanija i osadkonakoplenija* (Dynamic conditions of coastal-sea relief formation and sedimentation). Moskva: Nauka (Publ.), 1989. 269 p.
7. Ingl Dzh. *Dvizhenie pljazhevykh peskov (issledovanija s pomoshh'ju ljuminescentnykh indikatorov)* (The beach sand movement (studies using fluorescent indicators)). Leningrad: Gidrometeorol. Izd-vo (Publ.), 1971. 225 p.
8. Kutyrev Je. I. *Usloviya obrazovanija i interpretacii kosoj sloistosti* (Conditions for the formation and interpretation of oblique lamination). Leningrad: Nedra (Publ.), 1968. 128 p.
9. Wijnberg K. M. and Kroon A. Barred beaches. *Geomorphology*. 2002. No. 48 (2002). P. 103-120.
10. Ruessink B. G., Wijnberg K. M., Holman R. A., Kuriyama Y., van Enckevort I. M. J. Intersite comparison of interannual nearshore bar behaviour. *Journal of geophysical research*. 2003. Vol. 108. No. C8. P. 3249. DOI:10.1029/2002JC001505
11. Zenkovich V. P. *Morfologija i dinamika sovetских beregov Chernogo morja. Tom 1.* (Morphology and dynamics of the Soviet Black Sea shores of the. V.1). Moskva: Izd-vo AN SSSR (Publ.), 1958. 187 p.
12. Grasso F., Michallet H., Certain R., E. Barthélemy. Experimental flume simulation of sandbar dynamics. *Journal of coastal research*. 2009. SI 56. Vol. I. P. 54-58.
13. Saprykina Y., Kuznetsov S., and Korzinin D. Nonlinear transformation of waves above submerged structures. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 116 (1). P. 187-194.
14. Cheng J., Wang P., Smith E. R. Hydrodynamic conditions associated with an onshore migrating and stable sandbar. *Journal of Coastal Research*. 2016. Vol. 32. I. 1. P. 153-163.
15. Saleh Salem A., Jarno-Druaux A., and Marin F. Physical modelling of cross-shore beach morphodynamics under waves and tides. *Journal of Coastal Research*. 2011. SI 57. P. 139-143.
16. Leont'ev I. O. *Pribrezhnaja dinamika: volny, techenija, potoki nanosov* (Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows). Moskva: GEOS (Publ.), 2001. 272 p.
17. *Proektirovanie morskikh beregozashchitnykh sooruzhenij* (Design of offshore protective structures) SP 32-103-97, Korporacija "TRANSSTROJ", Moscow, 1998.
18. Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R., and Lescinski J. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*. 2009. Vol. 56 (11-12). P. 1133-1152.
19. Hasselmann K., Barnett T. P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D. E., Enke K., Ewing J. A., Gienapp H., Hasselmann D. E., Kruseman P., Meerburg A., Miller P., Olbers D. J., Richter K., Sell W., and Walden H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe*. 1973. Vol. 8 (12). P. 1-95.
20. Naumova V. A., Evstigneev M. P., Evstigneev V. P., and Ljubarec E. P. Wind-wave conditions of Azov-and-Black Sea coast of Ukraine. *Nauk. praci UkrNDGMI*. 2010. Vol. 259. P. 263-283. (in Russ.)
21. *Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volnenija Baltijskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo i Sredizemnogo morej* (Information on wind-wave regime of Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean Seas). Lopatuhin L. I. Ed. S.Pb.: Rossijskij Morskoj Registr Sudohodstva (Publ.), 2006, 452 p.
22. Coastal Engineering Manual. U.S. Army Corps of Engineers. Engineer Manual 1110-2-1100, *U. S. Army Corps of Engineers*, Washington, D. C. (in 6 volumes), 2002.
23. Kuznetsova O. A., Saprykina Ja. V., and Trifonova E. V. Jeksperimental'nye issledovanija vlijanija voln enija na deformacii rel'efa dna beregovoju zony (Experimental research of wave impact on coastal relief deformation). *Processy v geosredah*. 2015. No. 2 (2). P. 66-74. (in Russ.)
24. Dean R. G. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*. 1990. Vol. 7 (1). P. 53-84.