© Корзинин Д.В., 2021, Океанологические исследования, 2021, Том 49, № 2, С. 45–56

УДК 551.35.054:551.465.75 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(2).3

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ БЕРЕГОВОГО ПЕСЧАНОГО ПРОФИЛЯ ЗА ПОЛНЫЙ ШТОРМОВОЙ ЦИКЛ

Корзинин Д.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: korzinin2000@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.03.2021, одобрена к печати 21.05.2021.

Деформации берегового аккумулятивного профиля за полный штормовой цикл могут быть связаны как с особенностями индивидуальных штормов, так и с сезонными циклами волновой активности. Существует представление о «зимнем» и о «летнем» типах берегового профиля. Различия между этими типами профилей состоят в обособлении внешнего подводного вала зимой, за счет переноса материала на глубину, и увеличении уклонов дна в зоне наката волн летом, за счет переноса материала к берегу. В общих чертах такая динамика берегового профиля характерна и для полного штормового цикла, а послештормовой рельеф определяется характером фазы снижения интенсивности волнения, т.е. фазы затухания шторма. Затухание шторма может быть длительным и сопровождаться локальными пиками высот волн, которые будут уменьшаться постепенно. В этом случае шторм обладает высоким потенциалом к восстановлению пляжа, и подводный вал может сместиться в сторону берега. В другом случае затухание шторма может происходить относительно быстро – исходный профиль не восстанавливается, и по прошествии шторма его форма в большей степени отражает размыв в пиковую фазу. Актуальным является определение характера итоговых деформаций в конце штормового цикла, в частности, в конце фазы затухания шторма. В работе рассмотрены особенности штормовых деформаций берегового песчаного профиля, которые наблюдались при натурном эксперименте на побережье Болгарии и при мониторинговых наблюдениях на Балтийской косе. Деформации за полный штормовой цикл в двух рассматриваемых случаях имеют признаки сезонной динамики. В одном случае (побережье Болгарии) – это переход от типичного «летнего» профиля к профилю «зимнему». В другом случае (Балтийская коса) – выявлено смещение внешнего подводного вала к берегу, что можно рассматривать как переход к «летнему» профилю. Выявлено, что особенности стадии затухания штормов в двух рассматриваемых случаях имеют характерные отличия. Показано, что трансформации берегового профиля, характеризуемые как сезонные, могут происходить за полный цикл одного штормового события.

Ключевые слова: аккумулятивный берег, прибрежно-морские наносы, береговой профиль, сезонные деформации берегового профиля, штормовые деформации берегового профиля, подводный вал, штормовой цикл, стадия затухания шторма

Введение

Для большинства морских берегов, сложенных песчаными наносами, помимо кратковременных штормовых деформаций, характерных для фазы максимального развития штормового волнения, несомненный интерес представляют деформации за полный штормовой цикл. Такие деформации отражают текущую тенденцию развития берегового рельефа, обусловленную особенностями как отдельных штормовых событий, так и групп штормов, приуроченных к сезонным циклам штормовой активности.

Существует представление о том, что в период зимних интенсивных штормов значительная часть прибрежно-морских наносов переносится в нижнюю, более глубокую, часть подводного берегового склона. В умеренный летний период песчаный материал, в большинстве своем, перемещается к берегу. Морфологически это может быть выражено на профиле как обособление внешнего подводного вала зимой, за счет переноса материала на глубину, и увеличение уклонов дна в зоне наката волн летом, за счет переноса материала к берегу (рис. 1). Влияние сезонного волнового климата на морфологию берегового профиля впервые было описано Ф. Шеппардом (Shepard,1950) на основе исследований на побережье Калифорнии. Он описал эти состояния как зимний профиль с одним или несколькими барами (barred profile) и летний профиль без бара (non-barred profile). В дальнейшем эти наблюдения получили многократные подтверждения (Inman et al., 1993; Yates et al., 2009). В общих чертах такая динамика берегового профиля характерна и для полного штормового цикла – размыв в пиковую фазу шторма, при наиболее высоких и крутых волнах, сменяется аккумуляцией в верхней части берегового профиля, при относительно пологих и низких волнах стадии затухания шторма.

Вероятный морфодинамический эффект полного штормового цикла можно связать с такой характеристикой, как структура штормового события. Морфодинамическая роль структуры штормового события описана отечественными исследователями (Юркевич, 1977; Долотов, 1989). При усилении волнения внешний подводный вал смещается в сторону моря и стремится занять положение,

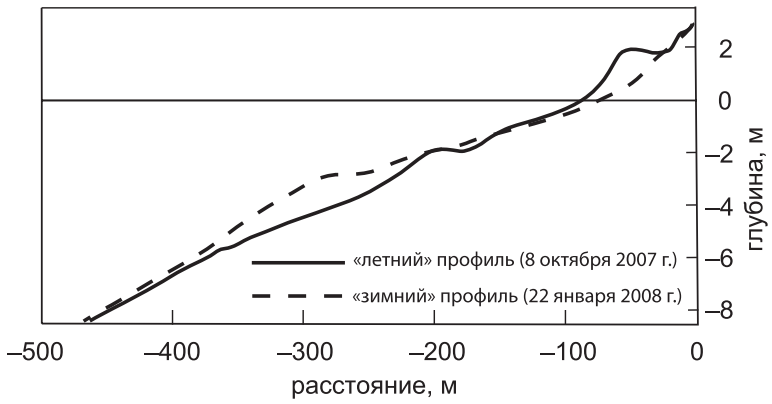

Рис. 1. Сравнение летнего и зимнего профилей береговой зоны (Сан-Диего, Калифорния, США; Yates et al., 2009)

соответствующее линии обрушения волн. При снижении интенсивности волнения подводный вал располагается в зоне трансформации волн, и за счет волнового переноса морские осадки с гребня вала перемещаются в сторону берега. Получается, что при затухании шторма сочетание таких факторов, как морфометрические параметры внешнего вала и волновые характеристики, определяют послештормовой рельеф, в частности то количество наносов, которое переносится к берегу. Послештормовому восстановлению рельефа береговой зоны способствуют две особенности стадии затухания волнения. В первую очередь, следует отметить тот факт, что чем ближе по своим значениям локальные пики высот волн при затухании к высоте волны в пиковую фазу шторма, тем интенсивней происходит волновой перенос осадков с гребня вала в сторону берега. Вторым фактором является продолжительность данной стадии шторма – если затухание шторма растянуто во времени, то в результате большее количество наносов будет перенесено к берегу к концу штормового цикла. Данная стадия штормового цикла является ключевой для динамики внешнего подводного вала и определяет итоговый послештормовой бюджет наносов в береговой зоне.

Актуальным является определение характера итоговых деформаций в конце штормового цикла, в частности, в конце фазы затухания шторма. Поставлена цель – определить морфологический эффект отдельного шторма не только с точки зрения его силы в пиковую фазу, но и с точки зрения характера стадии затухания волнения и того, как данная стадия штормового события определяет послештормовой рельеф берегового профиля. В данном исследовании используется концепция структуры штормового события, которая определяется тем, как волновая энергия, определяемая значением высоты волны, во время стадии затухания шторма соотносится с волновой энергией в фазу стабилизации.

Исследуемые участки и исходные данные

Исследование основывается на данных, полученных в ходе натурного эксперимента «Шкорпиловицы-2016» (западная часть Черного моря, Болгария) и во время мониторинговых наблюдений на исследовательском полигоне «Балтийск-2019» (Юго-Восточная Балтика, Калининградская область).

Первый участок относится к Камчийско-Шкорпиловскому пляжу (Болгария, западная часть Черного моря), на котором расположен экспериментальный полигон «Шкорполовицы» (Институт океанологии им. Ф. Нансена Болгарской академии наук, г. Варна), обрудованный специальной эстакадой для измерения параметров волнения и динамики берегового рельефа. Второй участок относится к северной части аккумулятивной пересыпи Балтийская коса (Юго-Восточная Балтика), отделяющей Калининградский залив от морской акватории. Эти участки имеют схожие лито- и морфодинамические условия, в частности, береговой профиль, сложенный песчаными наносами с внешним подводным валом в зоне обрушения наиболее крупных волн и системой внутренних валов меньшего размера (рис. 2).

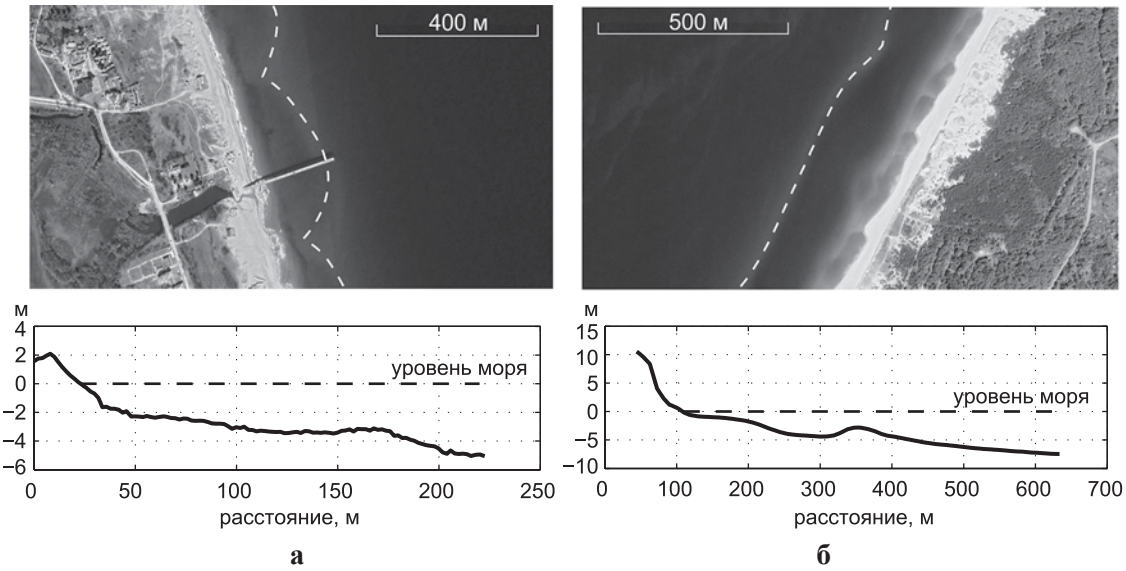

Рис. 2. Рельеф береговой зоны в плане (вверху; белым пунктиром показан контур внешнего подводного вала) и характерный береговой профиль (внизу); **а** – участок Камчийско-Шкорпиловского пляжа, **б** – участок аккумулятивной пересыпи Балтийская коса (снимки Google Earth)

Средний уклон подводного берегового склона на 5-ти метровой изобате на участке Шкорпиловицы составляет 0.02, на участке Балтийская коса – 0.01. Кроме уклона, отличием в рельефе береговой зоны является плановое очертание внешнего подводного вала. На побережье Болгарии подводный вал характеризуется ярко выраженной серповидной формой, а на побережье Балтийской косы внешний подводный вал во время наблюдений имел очень слабый изгиб и был ориентирован субпараллельно береговой линии. Различия в форме двух подводных валов могут быть обусловлены особенностями предшествующих штормовых событий, в частности, возникновение серповидных валов связано с воздействием так называемых краевых волн, распространяющихся вдоль берега (Davidson-Arnott, 2010). При наличии серповидных валов возрастает роль ячеистой циркуляции и преобладает трехмерный характер деформаций рельефа береговой зоны (Price et al., 2014). Более спрямленный вдоль берега бар сильнее подвержен отступанию в сторону моря и деградации из-за усиления роли противотечения (Aleman et al., 2013; Gervais et al., 2013). В данном исследовании рассматривается только двумерный характер деформаций берегового рельефа, т.е. деформации вдоль профиля.

Исследование основывается на наблюдении за волнением и изменением рельефа береговой зоны на двух указанных участках. На побережье Болгарии осенью 2016 г. был организован натурный эксперимент, в рамках которого со специально оборудованной эстакады производились непрерывные измерения параметров волн с помощью 18-ти емкостных датчиков и 3 раза в сутки осуществлялись измерения глубин дна с помощью металлического шеста и веревочного лота. Данный эксперимент продолжался в течение месяца и совпал с прохождением экстремального шторма.

В мае 2019 г. на берегу Балтийской косы был организован исследовательский полигон, на котором проводились периодические измерения рельефа береговой зоны. Измерения выполнялись в мае, июле и ноябре 2019 г. с маломерного судна с помощью эхолота Garmin GPSMAP 585 Plus и в пределах прибойной зоны и пляжа с помощью конфигурации из двух GPS приемников Emlid Reach RS+ (база + ровер). В период с 11 по 27 июля 2019 г. измерены волновые параметры с помощью буя Spotter Spoondrift, который был установлен в створе расположения исследовательского полигона «Балтийск-2019».

Для характеристики волнового режима на обоих участках использовались данные реанализа волнения ERA5 (ERA5 hourly data ….) Европейского центра среднесрочных прогнозов (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF). Реанализ ERA5 пришел на смену проекту ERA-Interim и отличается от предыдущей реализации более высоким качеством исходных данных о ветре (Rivas, Stoffelen, 2019). Положение ближайших к районам исследований точек на акватории, для которых были получены волновые данные, показано на рис. 3.

Данные реанализа волнения ERA5 были верифицированы на основе измерения волновых параметров в береговой зоне с помощью буя Spotter Spoondrift (Балтийская коса) и с помощью ёмкостных датчиков волнения (побережье Болгарии). Результаты сравнения данных реанализа с измерением для побережья Болгарии приведены ниже. Анализ сравнения данных реанализа с измерениями на Балтийском море представлены в работе (Shtremel, 2021). В обоих случаях показано, что данные реанализа волнения ERA5 имеют вполне удовлетворительную сходимость с данными измерения волновых параметров в береговой зоне.

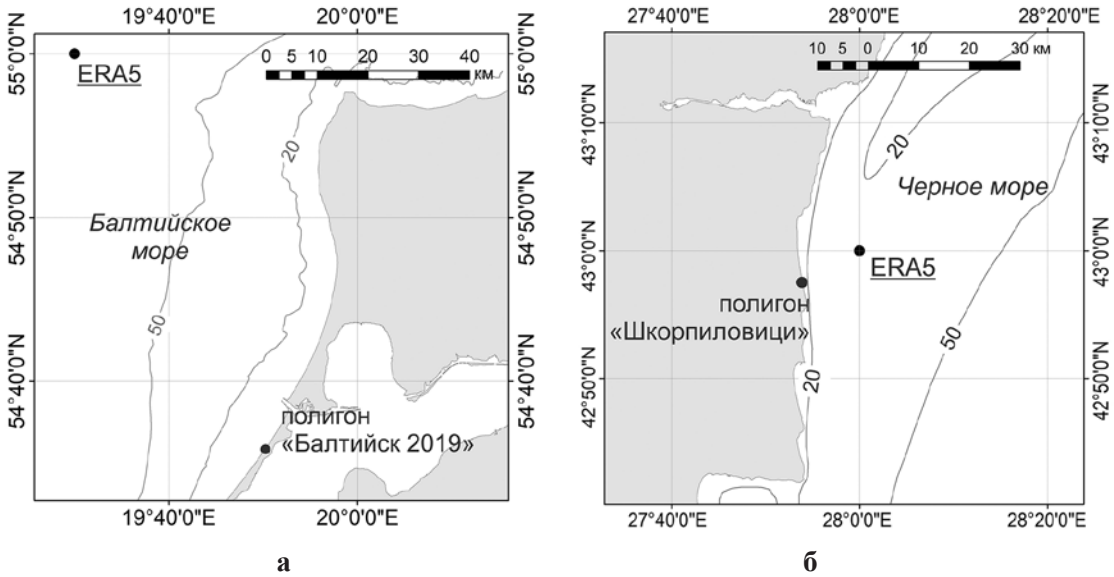

Рис. 3. Расположение расчетных точек получения данных реанализа ERA5 относительно исследуемых участков берега (**а** – северная часть Балтийской косы, Юго-Восточная Балтика; **б** – район Камчийско-Шкорпиловицкого пляжа, Болгария).
Картографическая основа: данные проекта OSM (openstreetmap.org), топокарты Генштаба СССР, навигационная карта «Черное и Азовское моря» (ФГУ «Укрморкартография»)

Обсуждение результатов

Для каждого из исследуемых участков рассмотрены временные отрезки, в пределах которых выполнены измерения берегового профиля. Морфодинамику берегового рельефа за время прохождения натурного эксперимента на болгарском побережье иллюстрируют три характерных профиля (рис. 4). Изначально профиль имеет относительно крутой уклон в зоне заплеска (приурезовая часть берегового профиля, где происходит последнее обрушение волн) и более пологий уклон без признаков подводного вала в глубокой части. После прохождения сильного шторма 16–18 октября 2016 г. произошло обособление внешнего подводного вала. Измерения берегового профиля сразу после затухания основного пика шторма позволили выявить увеличение высоты гребня вала и формирование ложбины между валом и берегом (см. рис. 4 – профиль, измеренный 19 октября). Уклон профиля в зоне заплеска стал более пологим. Следует отметить, что в промежуток между 7-м и 19-м октября, во время пиковой фазы шторма, произошел сильный размыв берегового профиля с выносом наносов на большие глубины, что видно по бюджету наносов при сравнении соответствующих профилей (рис. 4). В дальнейшем, к концу наблюдений за рельефом (см. рис. 4 – профиль, измеренный 31 октября), гребень подводного вала немного снизился за счет переноса части материала ближе к урезу.

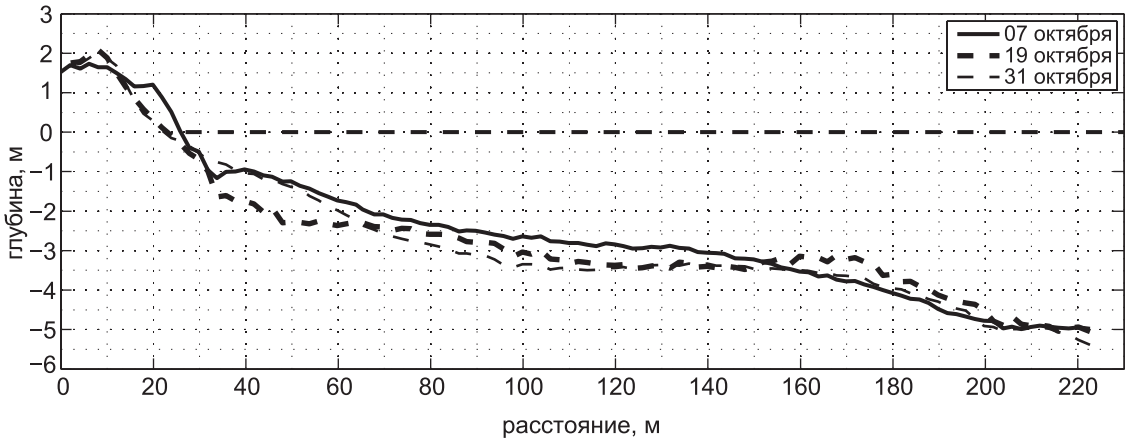

Рис. 4. Динамика берегового профиля Камчийско-Шкорпиловского пляжа за период измерений

Морское волнение во время натурного эксперимента на болгарском побережье характеризуется одним ярко выраженным пиком (см. рис. 5 – 16–18 октября). Затухание основного пика шторма произошло достаточно интенсивно. До окончательного затухания шторма наблюдался один слабо выраженный пик волн зыби высотой 1.2 м (см. рис. 5 – 25–28 октября), в то время как высоты волн во время максимального развития шторма достигали значения 2.8 м.

В рамках мониторинговых наблюдений на Балтийской косе отдельные измерения берегового профиля были разделены продолжительными временными

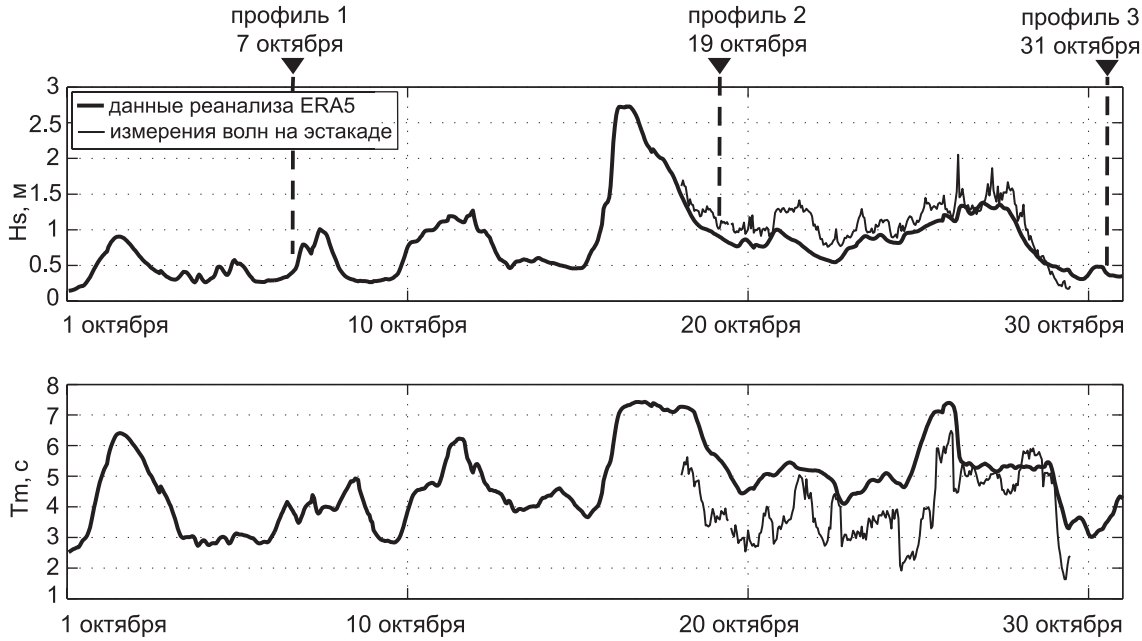

Рис. 5. Изменение волновых параметров в районе Камчийско-Шкорпиловского пляжа (б) за время проведения натурного эксперимента согласно данным реанализа волнения ERA5. Данные измерения волн на эстакаде приведены для верификации данных реанализа волнения ERA5.
Здесь и далее: Hs – значительная высота волн, м; Tm – средний период волн, с

промежутками (рис. 6). После прохождения сильного шторма в период с 30 июня по 10 июля 2019 г. (рис. 7), когда высота волны (Hs) достигла значения 4 м, произошло смещение внешнего подводного вала в сторону берега на расстояние около 25 м с одновременным увеличением глубин над гребнем подводного вала. Данные реанализа ERA5 показали, что этот шторм был единственным относительно сильным штормом за период между измерениями профиля № 1 и профиля № 2 (21 мая–30 июля 2019 г.). Таким образом, смещение внешнего подводного вала в сторону берега в этот период случилось в результате прохождения одного экстремального шторма, который характеризовался ярко выраженным основным пиком и серией пиков

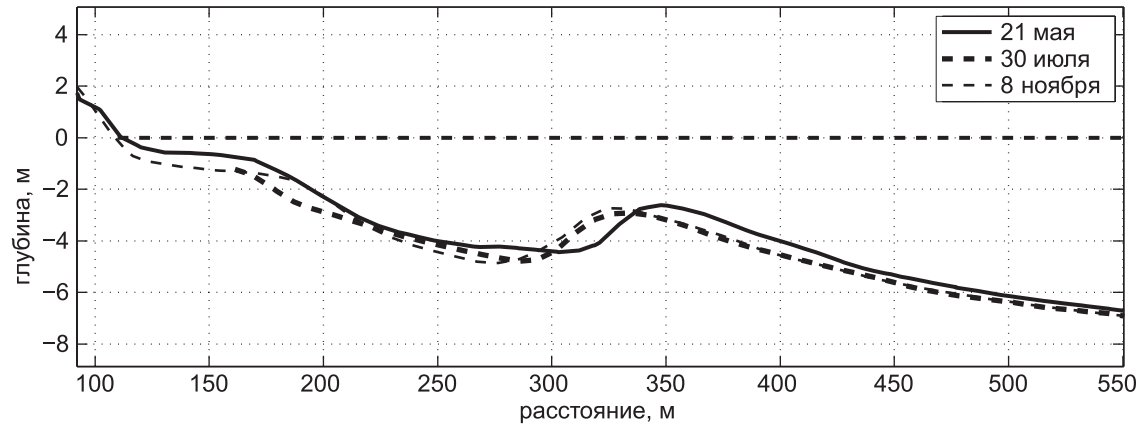

Рис. 6. Динамика берегового профиля Балтийской косы за период измерений

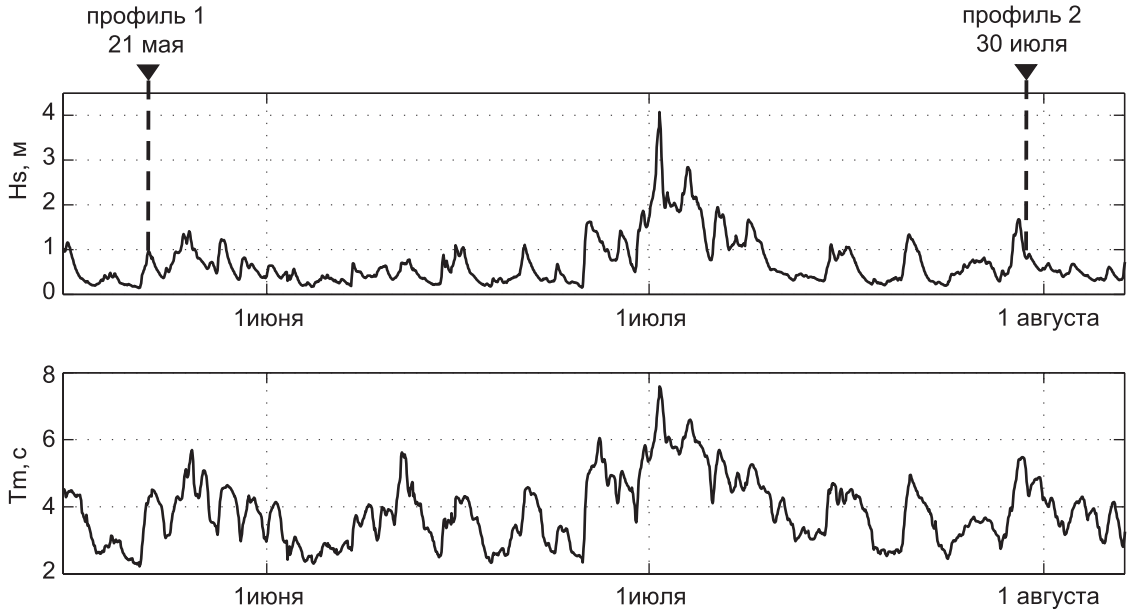

Рис. 7. Изменение волновых параметров согласно данным реанализа волнения ERA5 в районе Балтийской косы за период между измерением профиля № 1 и профиля № 2 (21 мая–30 июля 2019 г.)

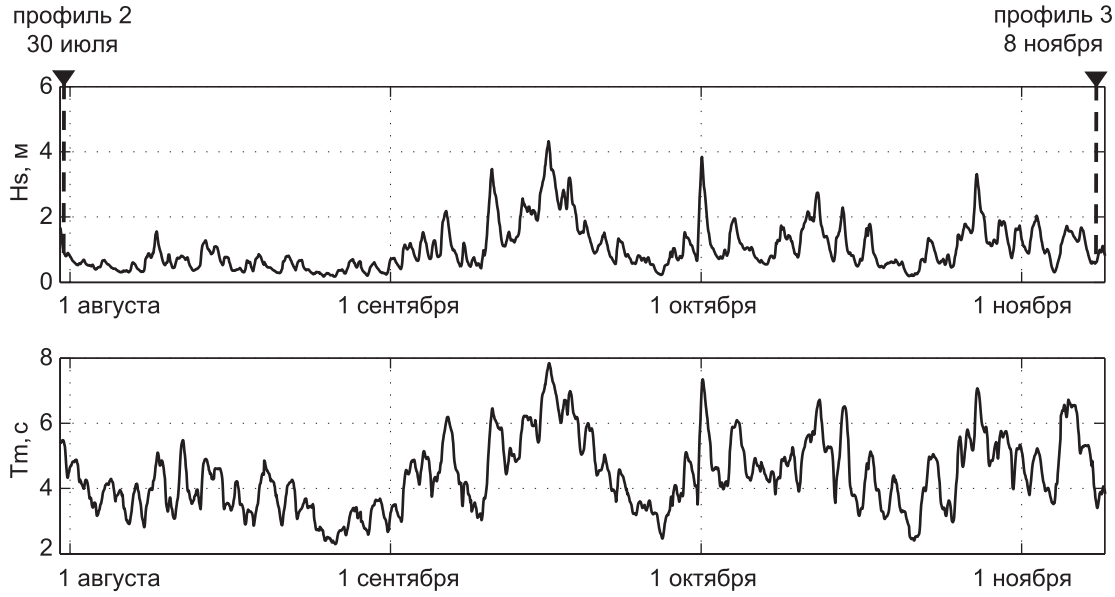

Рис. 8. Изменение волновых параметров согласно данным реанализа волнения ERA5 в районе Балтийской косы за период между измерением профиля № 2 и профиля № 3 (30 июля–8 ноября 2019 г.)

с постепенным уменьшением высоты волны во время стадии затухания. В дальнейшем, за период с 30 июля по 8 ноября 2019 г., заметных смещений подводного вала не произошло. В данный период наблюдался еще один шторм с высотой волн в максимальную фазу до 4 м (см. рис. 8 – 10–22 сентября), однако выявить морфодинамический эффект от прохождения данного шторма не представляется возможным, т.к. следующее измерение рельефа было выполнено только 8 ноября.

Наблюдения за морфодинамикой береговой зоны Балтийской косы и Камчийско-Шкорпиловского пляжа продемонстрировали деформации берегового профиля, которые, с точки зрения классических представлений, описанных выше, можно охарактеризовать как сезонные. На болгарском побережье наблюдалось выполаживание зоны наката волн и формирование подводного вала, т.е. переход от «летнего» профиля к «зимнему». На берегу Балтийской косы выявлено смещение подводного вала к берегу с увеличением глубины над валом, т.е. переход от «зимнего» профиля к «летнему». В обоих случаях изменения берегового профиля связаны не с серией штормовых событий, а с отдельными штормовыми ситуациями. Интерес представляет определение принципиальных различий структуры данных штормовых событий.

Для рассматриваемого случая на болгарском участке затухание шторма сопровождалось одним слабо выраженным пиком, высота волны при котором значительно ниже высоты волны при основном пике шторма (рис. 5). Для рассматриваемого случая на балтийском участке смещение внешнего подводного вала в сторону берега произошло в результате прохождения одного экстремального шторма, который характеризовался ярко выраженным основным пиком и серией пиков с постепенным уменьшением высоты волны во время стадии затухания (рис. 7).

Выводы

Натурные наблюдения за береговым рельефом показали, что характер стадии затухания волнения во многом определяет динамику внешнего подводного вала. Прохождение одного шторма, который сопровождается растянутой во времени стадией затухания, включающей несколько постепенно снижающихся локальных волновых пиков, может привести к деформациям берегового профиля, которые характерны при переходе от «зимнего» профиля к «летнему». В рассматриваемом случае на Балтийской косе для «летнего» профиля характерно смещением подводного вала ближе к берегу.

Прохождение шторма, сопровождающегося одним ярко выраженным пиком, который относительно быстро затухает, может привести к появлению признаков «зимнего» профиля, что наблюдалось во время натурного эксперимента на побережье Болгарии. Таким образом, трансформации берегового профиля, определяющиеся как сезонные, могут происходить за полный цикл одного штормового события, которое характеризуется специфическими особенностями стадии затухания.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема № 0128-2021-0004).

Литература

Долотов Ю.С. Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления. М.: Наука, 1989.

Юркевич М.Г. Общая характеристика гидродинамических условий накопления тяжелых минералов в верхней зоне шельфа. В кн.: Процессы прибрежно-морского россыпеобразования. М.: Наука, 1977.

ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present // https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form (дата обращения 05.03.2021).

Aleman N., Robin N., Barusseau J-P., Gervais M. Net offshore bar migration variability at a regional scale: Inter-site comparison (Languedoc-Roussillon, France) // Journal of Coastal Research**.** Special Issue. No. 65. 2013.

Davidson-Arnott R. An introduction to coastal processes and geomorphology. Cambridge University Press, Cambridge, 2010.

Inman D.L., Elwany H.S., Jenkins S.A. Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches // J. of Geophys. Res. 1993. Vol. 98. No. C10. P. 18181–18199.

Gervais M., Balouin Y., Certain R. The major control parameters of storm morphological evolution on a microtidal barred beach. // Proceeding book of the Coastal Dynamics, held in Arcachon, France in April. 2013.

Price T.D., Ruessink B.G., Castelle B. Morphological coupling in multiple sandbar systems – a review // Earth Surf. Dynam. 2. 309–321, 2014.

Rivas M.B., Stoffelen A. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT // Ocean Science. 2019. Vol. 15. Iss. 3. P. 831–852.

Shepard F.P. Beach cycles in southern California. Beach Erosion Board. Technical Memorandum 15. 1950. 32 p.

Shtremel M. ERA5 wave data verification with buoy field measurements in the nearshore region of the Baltic Sea // Abstract book of 6th IAHR Europe Congress, Feb 15–18, 2021. Warsaw, Poland. P. 433–434.

The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. The Wamdi Groupe // Journal of Physical Oceanography. 1988. Vol. 18. Iss. 12. P. 1775–1810. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2.

Yates M.L., Guza R.T., O'Reilly, W.C. & Seymour R.J. Overview of seasonal sand level changes on southern California beaches. Shore & Beach 77. 2009. P. 39–46.

Океанологические исследования. 2021. Том 49. № 2. С. 45–56

SPECIAL ASPECTS OF DEFORMATION OF COASTAL PROFILE DURING A FULL STORM CYCLE

Korzinin D.V.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: korzinin2000@mail.ru
Submitted 11.03.2021, accepted 21.05.2021.

Deformations of the coastal accumulative profile during a full storm cycle can be related both to the special aspects of individual storms and to seasonal cycles of wave activity. There is a concept of a "winter" and a "summer" type of coastal profile. The difference between these types of profiles is the isolation of the outer underwater berm in winter due to the transfer of sand material to depth and an increase of slopes in the surf zone in summer due to the transfer of sand material to the shore. In this case, the post-storm relief is determined by the character of the wave intensity reduction phase, i.e., the storm attenuation phase. The attenuation of the storm can be prolonged and accompanied by local peaks in wave heights, which will decrease gradually. In this case, the storm has a high potential for beach recovery and the underwater berm may shift toward the shore. In another case, storm attenuation can occur relatively quickly – the original profile is not recovered and at the end of the storm, the profile shape reflects the erosion in the peak phase. Relevant is the determination of the special features of the resulting deformations at the end of the storm cycle, in particular at the end of the storm attenuation phase. In this paper, the special features of storm deformations of the coastal sand profile, which were observed during field experiment on the Bulgarian coast and during monitoring observations on the Baltic Spit, are considered. In one case (the Bulgarian coast) it is a transition from the typical "summer" profile to the "winter" profile. In another case (Baltic Spit), a shift of the outer underwater berm toward the shore was revealed, which can be considered as a transition to the "summer" profile. It is revealed that the features of the storm attenuation stage in the two cases under consideration have specific differences. It is shown that transformations of the coastal profile, characterized as seasonal, can occur during the full cycle of a single storm event.

Keywords: accumulative coast, coastal sediments, coastal profile, storm deformation of coastal profile, seasonal deformation of coastal profile, underwater bar, storm cycle, storm attenuation

Acknowledgement: The investigation was carried out within the framework of the state task of the Shirshov Institute of Oceanology, RAS (theme No. 0128-2021-0004).

References

Dolotov, Yu.S., 1989: *Dinamicheskie obstanovki pribrezhno-morskogo rel'efoobrazovanija i osadkonakoplenija* (Dynamic relief-forming and depositional sedimentary environments in the near-shore marine area). Moscow, Science, 269 p., ISBN 5-02-003362-6 (In Russian).

ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present, https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form (дата обращения 05.03.2021).

Davidson-Arnott, R., 2010: *An introduction to coastal processes and geomorphology.* Cambridge University Press, Cambridge.

Inman, D.L., H.S. Elwany, and S.A. Jenkins, 1993: Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. *J. of Geophys. Res.*, **98**(C10), 18181–18199.

Gervais, M., Y. Balouin, and R. Certain, 2013: The major control parameters of storm morphological evolution on a microtidal barred beach. *Proceeding book of the Coastal Dynamics, held in Arcachon*, France in April.

Price, T.D., B.G. Ruessink, and B. Castelle, 2014: Morphological coupling in multiple sandbar systems – a review. *Earth Surf. Dynam.*, 2, 309–321.

Rivas, M.B. and A. Stoffelen, 2019: Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. *Ocean Science*, 15, 3, 831–852.

Shepard, F.P., 1950: Beach cycles in southern California. Beach Erosion Board. *Technical Memorandum,* 15, 32 p.

Shtremel, M. ERA5 wave data verification with buoy field measurements in the nearshore region of the Baltic Sea. *Abstract book of 6th IAHR Europe Congress*, Feb 15–18, 2021, Warsaw, Poland, 433–434.

The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. In: The Wamdi Groupe, 1988: *Journal of Physical Oceanography*, **18**(12), 1775–1810, https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2.

Yates, M.L., R.T. Guza, W.C. O'Reilly, and R.J. Seymour, 2009*: Overview of seasonal sand level changes on southern California beaches*, Shore & Beach, 77, 39–46.

Yurkevich, M.G., 1977: Obshhaja harakteristika gidrodinamicheskih uslovij nakoplenija tjazhelyh mineralov v verhnej zone shel'fa (General characteristics of hydrodynamic conditions of heavy minerals accumulation in the upper shelf zone). *Processy pribrezhno-morskogo rossypeobrazovanija (Processes of coastal-marine placer formation)*. Moscow, Nauka, (In Russian).