

На правах рукописи



Кузнецова Ольга Андреевна

**ВЛИЯНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН НА ДИНАМИКУ РЕЛЬЕФА
БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ, СЛОЖЕННОЙ ПОДВИЖНЫМИ ПЕСЧАНЫМИ
НАНОСАМИ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧИЙСКО-ШКОРПИЛОВСКОГО
ПЛЯЖА, БОЛГАРИЯ)**

Специальность 25.00.28 – «Океанология»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель:

Сапрыкина Яна Владимировна

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории шельфа и морских берегов им. В.П. Зенковича Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук

Официальные оппоненты:

Кантаржи Измаил Григорьевич

доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Архипкин Виктор Семенович

кандидат географических наук, доцент кафедры океанологии Географического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Защита состоится «___» _____ 2021 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.239.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математический наук

Соловьев Дмитрий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект и актуальность исследования. Область интересов настоящей работы – береговая зона бесприливных морей. Под термином «береговая зона» подразумевается участок дна и берега, в котором происходит взаимодействие волн с рельефом. Объект изучения – это подводный береговой склон или подводный профиль пляжа. Его нижняя граница простирается до глубины замыкания, где вертикальные деформации рельефа, вызванные волнением, сходят на нет [Coastal Engineering Manual, 2002]. В Черном море этот рубеж проходит в среднем на глубине 30 м [Зенкович, 1962]. В работе исследовались деформации, связанные прежде всего с поперекбереговым движением наносов: при стабильном положении уровня моря, в условиях отсутствия дефицита наносов и значительных градиентов вдольберегового транспорта наносов. Факторов, создающих разнонаправленные потоки наносов вдоль оси берег–море и влияющих на рельеф, много [Зенкович, 1962; Долотов, 1989]. Например, противотечение, которое компенсирует стоков перенос масс к берегу, способствует выносу наносов в сторону моря. Асимметрия волн, развивающаяся в ходе трансформации волн, может создавать условия для перемещения наносов в сторону берега. Сила тяжести стремится переместить наносы вниз – в сторону увеличения глубины (от берега). В прибрежной зоне существуют также длинноволновые колебания, связанные с группами высоких и низких ветровых волн, а также с изменением положения зоны обрушения [Леонтьев, 2014]. Проблема изучения воздействия волнения на берег заключается в невозможности раздельного изучения изменений рельефа и трансформации волн. Природные системы изменяются, чтобы достичь равновесия и компенсировать воздействие извне [Сапрыкина и др., 2009; Мычко, 2010]. Следствием этого является взаимная подстройка волнения и рельефа [Wijnberg, Kroon, 2002]. Дополнительную сложность вносит нерегулярность волнения, существенная изменчивость его спектра, которая во многом определяет ход трансформации волн при подходе к берегу [Boszar, Davidson, 1987; Сапрыкина и др., 2013] и, следовательно, отклик рельефа [Леонтьев, 2001; Grasso et al., 2009; Saleh Salem, 2011; Cheng et al., 2016]. Таким образом рельеф дна и берегов, сложенных подвижными песчаными наносами, представляет собой тонкий баланс взаимодействия всех этих сил и процессов. Для решения практических задач: прогнозирования развития берега, оценки его уязвимости и принятия решения способах берегозащиты, – в настоящее время используют

различные варианты математического моделирования. Задача моделирования заключается в аккуратном описании и воспроизведении отдельных процессов, чтобы учесть их в формуле расхода наносов, а потом через закон масс сохранения рассчитать изменение глубин по расходу наносов. Современные модели, достаточно сложны и требовательны к начальным и граничным условиям. Между тем на сегодняшний день нет однозначного ответа на вопрос, какие параметры волн и как именно влияют на процессы транспорта наносов на разных масштабах времени. Четкого представления о влиянии трансформации волнения в береговой зоне моря на подводный рельеф дна пока нет. Это связано прежде всего с недостаточным количеством натурных данных, позволивших бы провести подробный анализ происходящих процессов.

С учетом изложенного выше, проблема изучения влияния трансформации волн на динамику рельефа береговой зоны, сложенной подвижными песчаными наносами, является весьма **актуальной**. В диссертационной работе применительно к выбранному участку берега Черного моря (Камчийско-Шкорпиловский пляж) была использована современная литодинамическая модель – xBeach [Van Rijn et al., 2011]. Параллельно на том же участке проводились натурные эксперименты по наблюдению за трансформацией волнения и рельефа. Совместный анализ данных наблюдений *in situ* и результатов численных экспериментов позволил получить комплексную картину динамики рельефа, проанализировать отдельные процессы и сделать вывод об их значимости.

Цель и задачи. Цель работы – описание динамики прибрежной зоны, выявление зависимостей деформаций подводного рельефа дна от параметров волн и физических процессов их трансформации.

В задачи исследования входят:

- анализ имеющихся в литературе эмпирических зависимостей профиля пляжа от параметров волн и свойств наносов;
- анализ натурных данных и установление закономерностей деформации поперечного профиля пляжа от параметров волнения;
- проверка выявленных закономерностей путем моделирования;
- оценка значимости каждого из параметров волнения на разных масштабах времени.

Научная новизна работы заключается в том, что литодинамические процессы и деформации рельефа были связаны с процессами нелинейной трансформации волн и со спектральными характеристиками волнового режима. Анализ уникального массива натурных данных по синхронному наблюдению за трансформацией нерегулярных волн и деформациями дна, позволил конкретизировать некоторые особенности системы береговой зоны. Установлено влияние особенностей нелинейной трансформации волн на изменение подводного профиля песчаного пляжа. Выявлено влияние типа обрушения на процесс переформирования рельефа дна. Данными натурных наблюдений детально подтверждена роль асимметрии волн в волновом транспорте наносов и переработке профиля. По данным натурных экспериментов удалось подтвердить и детализировать процесс движения песчаных наносов в форме «мобильных» валов, наблюдавшихся при размыве и восстановлении берега во время развития и затухания шторма. Эти валы значительно меньше, чем подводные вдольбереговые валы в традиционном понимании, но гораздо больше, чем ритмические донные формы, такие как рифели.

Теоретическая и практическая значимость работы. Научная значимость исследования – это вклад в развитие теории эволюции песчаных побережий. При подготовке диссертации выяснены детали эволюции берега на временном масштабе отдельного шторма; определены основные волновые параметры и физические процессы. Практическая значимость исследования связана с обеспечением безопасности хозяйственной деятельности береговых зон и заключается в том, что результаты позволят создать методическую основу для упрощенных прогнозов деформаций рельефа дна в береговой зоне, выбора оптимальных способов берегозащиты и разработки рекомендаций по установке берегозащитных подводных конструкций.

Методология и методы исследования. Исследование основано на совместном использовании данных уникальных натурных экспериментов по синхронному наблюдению за волнением и деформациями рельефа в прибрежной зоне, а также средств одной из самых современных литодинамических моделей – xBeach. Натурные наблюдения проводились на Камчийско-Шкорпиловском пляже (побережье Черного моря, Болгария) в сентябре-октябре 2007 г. и октябре-ноябре 2016 г.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Показано, что волновой транспорт наносов зависит от процессов нелинейной трансформации нерегулярного волнения в береговой зоне. Эволюция поперечного подводного профиля песчаного пляжа может быть качественно оценена с помощью эмпирических чисел (Урселла, Ирибаррена, Дина), характеризующих нелинейность волн.
- 2) Доказано, что тип обрушения и положение зоны обрушения определяют штормовые деформации поперечного профиля береговой зоны. Обрушение ныряющим буруном приводит к размыву, отступанию уреза и образованию подводных валов, а обрушение скользящим буруном сопровождается восстановлением и сглаживанием подводного рельефа дна.
- 3) Установлен механизм перемещения песчаных наносов в приурезовой зоне в форме «мобильных» валов, которые образуются в мористой части профиля за счет выноса материала с берега и движутся к берегу в период затухания шторма, в результате чего наносы аккумулируются вблизи уреза.
- 4) Выявлено, что положение подводного вала на подводном склоне влияет на отступление берега во время штормового воздействия. Наибольшее отступление уреза будет наблюдаться при положении вала на расстоянии от берега, близком к половине длины подходящих волн.

Личный вклад автора. Автор диссертации участвовала в полевых работах по синхронному измерению изменений рельефа и волнения в береговой зоне в рамках международного эксперимента «Шкорпиловцы-2016». Автор диссертации проводила обработку натурных данных волнения и деформаций рельефа, полученных в ходе натурных экспериментов 2007 и 2016 гг., а также ставила, выполняла и проводила анализ численных экспериментов при помощи модели xBeach.

Степень достоверности и апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены на заседаниях Ученого совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (март 2019 г., январь 2020 г.), а также на Второй всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» в Москве (2017 г.) и на четырех международных конференциях: 12-й Международной конференции по окружающей среде прибрежных районов Средиземного моря в Варне (MEDCOAST),

Болгария (2015 г.); WISE в Венеции, Италия (2016 г.); 11-й Международной конференции Морские берега «Управление рисками в прибрежной зоне в условиях меняющегося мира» в Санкт-Петербурге, Россия (2016 г.); Генеральной ассамблее Европейского геофизического союза (EGU) в Вене, Австрия (2017 г.); 17-й Международный конгресс по морским перевозкам и освоению морских ресурсов (ИМАМ) в Лиссабоне, Португалия (2017 г.).

Публикации. Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. По теме диссертации было опубликовано 16 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах (в соавторстве). Из них 3 статьи входят в системы международного цитирования (2 – в Web of Science, 3 в Scopus) и 4 – в РИНЦ.

Результаты исследований по теме диссертации были также опубликованы в форме тезисов и трудов международных (8 публикаций) и российских (1 публикация) конференций, из которых 2 публикации проиндексированы в базе данных Web of Science, 4 – в Scopus, 2 – в РИНЦ. Кроме того автор диссертации принял участие в подготовке коллективной монографии, вошедшей в базу публикаций РИНЦ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных литературных источников, списка рисунков и списка таблиц. Объем работы составляет 141 страницу, включая 67 рисунков и 12 таблиц. Библиографический список состоит из 129 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Яне Владимировне Сапрыкиной за внимательное наставничество, ведение научного исследования, профессиональную поддержку на всех этапах работы. Автор искренне благодарит коллектив Лаборатории шельфа и морских берегов, в особенности д.г.н. И.О. Леонтьева за обсуждения и помощь в интерпретации получаемых результатов, а также д.ф.-м.н. С.Ю. Кузнецова за конструктивные замечания и возможность участия в экспедиционных исследованиях, а также М.Н. Штремель и к.г.н. Д.В. Корзинина за дружескую и профессиональную поддержку. Автор выражает признательность сотрудникам Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова руководителю лаборатории литодинамики и геологии д.г.н. Р.Д. Косьяну и к.г.н. Б.В. Дивинскому за предоставленные архивные материалы и успешное сотрудничество, а также сотрудникам Института океанологии Болгарской академии наук Е. Трифионовой и Н. Андреевой за океанологии за обмен

опытом, интерес к исследованию автора и дружественную атмосферу в экспедиции. Отдельная благодарность автора коллегам из отдела морских прикладных исследований и изысканий Государственного института океанографии им. Н.Н. Зубова к.ф.-м.н. Ю.А. Реве, П.Е. Ликутову, В.В. Архипову и в особенности начальнику отдела к.г.н. А.С. Цвечинскому за поддержку и мотивацию в процессе подготовки к защите диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении представлена общая характеристика работы, цели и задачи исследования, кратко сформулированы актуальность и научно-практическая значимость исследования, закреплены защищаемые положения, оценен личный вклад автора, представлена информация об апробации работы и вышедших публикациях, а также описана структура диссертационной работы.

Глава 1 посвящена современному состоянию проблемы и ее изученности, на основании анализа которых сделано заключение об актуальности темы исследования. В **разделе 1.1** описаны основные варианты получения данных наблюдений для анализа процессов деформации рельефа береговой зоны, кратко охарактеризованы плюсы и минусы разных способов. По данным публикаций обобщены сведения о существующих долговременных рядах наблюдений за поперечным профилем пляжа, а также описаны варианты анализа движения наносов непосредственно через взаимодействие ними: гранулометрический анализ донных отложений и метод меченых песков. Рассмотрены варианты применения дистанционных методов (спутниковые снимки, лидарные авиасъемки, стационарные радары и фото-видео мониторинг береговой зоны). Отдельно рассмотрено лабораторное моделирование: суммированы данные о некоторых наиболее значительных международных экспериментах и лабораторных установках (волновых лотках), на которых они проводились. В **разделе 1.2** описано развитие представлений о динамике береговой зоны через три основных подхода к численному литодинамическому моделированию: концепция профиля равновесия, интегральные инженерные модели и комплексные модели, учитывающие физические процессы динамики рельефа. Общим свойством моделей, основанных на профиле равновесия, является их независимость от гидродинамических особенностей района. Профиль равновесия характеризует условия в береговой зоне, когда отношение скорости диссипации энергии волн на единицу

объема воды в береговой зоне неизменно, однако в само уравнение параметры волнения не входят [Dean, 1991]. Интегральные инженерные модели основаны на энергетической концепции Бэгнольда [Bagnold, 1953] и интегральной оценке процессов, определяющих транспорт наносов в береговой зоне. Интегральные модели, например CROSS-P [Леонтьев, 2014] и литодинамический блок расчетного комплекса Института океанографии им. Н.Н. Зубова [Дианский и др., 2015], не описывают реальные процессы взвешивания наносов, не учитывают зависимость перемещения наносов от групповой структуры волн. Они работают в предположении регулярности волнения. Общий перенос в энергетических моделях осуществляется за счет придонного компенсационного противотечения, изученность которого в настоящее время нельзя признать достаточной. Комплексные современные литодинамические модели, среди которых и используемая для исследования в рамках данной диссертации xBeach, стремятся аккуратно воспроизводить все процессы, влияющие на движение наносов. В этих моделях за отдельные группы физических процессов отвечают разные блоки. Такой способ требует больших вычислительных мощностей, в связи с чем в моделях применяются упрощения и параметризации, в связи с чем становится чрезвычайно важным вопрос о правильном задании начальных и граничных условиях, а также выбор значений калибровочных коэффициентов.

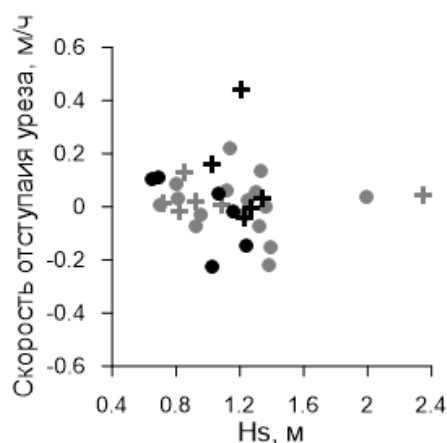
Глава 2 содержит информацию о методах исследования и фактических данных, используемых в настоящей работе. **Раздел 2.1.** посвящен натурным данным. Приведено краткое описание физико-географических условий в районе Камчийско-Шкорпиловского песчаного пляжа (40 км к югу от г. Варны, Болгария), на котором проводились синхронные наблюдения за волнением и динамикой рельефа в береговой зоне в период 14.09–11.10.2007 г. и 07.10–02.11.2016 г. До глубин 2.5 м берег сложен грубо- и среднезернистыми песчаными отложениями. Камчийско-Шкорпиловский пляж открыт в сторону преобладающего направления ветра, ничем не защищен от ветровых волн и волн зыби и относится к наиболее уязвимому типу берегов на всем Болгарском побережье [Valchev et al., 2014]. В двух натурных экспериментах было получено 89 поперечных профилей береговой зоны от берега до глубин 4.5–5 м. Данные измерений позволили пронаблюдать штормовой размыв и восстановление профиля в результате штормового воздействия, образование и движение небольших валов в приурезовой области при наличии и отсутствии стабильного вала на глубинах

4–5 м, а также образование и замыв этого большого вала в результате изменения режима волнения и, в частности, типа обрушения волн. Натурные данные о волнении представляли собой измерения струнных датчиков волнения, регистрировавших положение свободной поверхности с частотой от 5 до 20 Гц и минимальной продолжительностью 20 мин. По полученным хронограммам рассчитаны основные параметры волнения: значительная высота волны, период спектрального пика, направление подхода волн, длина и крутизна волн. Дополнительно велись визуальные наблюдения за типом волнения и обрушения, положением зоны обрушения и направлением подхода волн. В ходе двух экспериментов наблюдался достаточно широкий спектр режимов волнения: высота значительных волн на конце эстакады изменялась от 0.1 до 2.4 м. Наибольшие волны зарегистрированы в ходе шторма 17–19 октября 2016 г. В **разделе 2.2** приведено краткое описание основных блоков и особенностей численной модели – xBeach. Она относится к комплексным моделям, учитывающим физические процессы динамики береговой зоны [Фокина, 2007], и изначально создавалась для оценки штормовых размывов на песчаных пляжах. xBeach предлагает три варианта расчета волн и течений: гидростатический для стационарного (осредненные волновые уравнения, нет групповых волн) и нестационарного режимов волнения (учет волнения на масштабе волновых групп) и негидростатический режим (воспроизводятся как короткие, так и длинные волны). Расчеты в модели xBeach производятся на регулярной (структурированной) прямолинейной или криволинейной сетке типа C по классификации Аракавы [Мезингер, Аракава, 1979]. На внешней (морской) границе расчетной области задаются колебания свободной поверхности: волны и при необходимости уровень. Для потока наносов на боковых границах установлено условие отсутствия градиента. Характеристики донного грунта можно задавать через характерный диаметр наносов: медианный (D50, основной параметр), также можно дополнительно задавать 15% и 90% размеры наносов. В **разделе 2.3** описаны методы обработки и анализа данных натурных и численных экспериментов. Деформации рельефа оценивались количественно через расчет скорости деформации профиля (изменения удельного объема наносов на профиле) и скорости перемещения уреза. Также анализировались положение и высота подводных валов. Для оценки влияния волнения на рельеф береговой зоны помимо отдельных параметров волнения, таких как высота, период, крутизна, рассчитывались комплексные параметры числа

Дина, Ирибаррена и Урселла. Параметр Дина характеризует соотношение уровня энергии приходящих волн и размера и размера частиц наносов, слагающих берег и используется в инженерных моделях для определения формируемого профиля: аккумулятивного (при малых значениях параметра) или эрозионного. Число Урселла характеризует соотношение между нелинейными дисперсионными процессами при трансформации волн. Число Ирибаррена может применяться в качестве индикатора существования обмена энергией между основной и высшими гармониками.

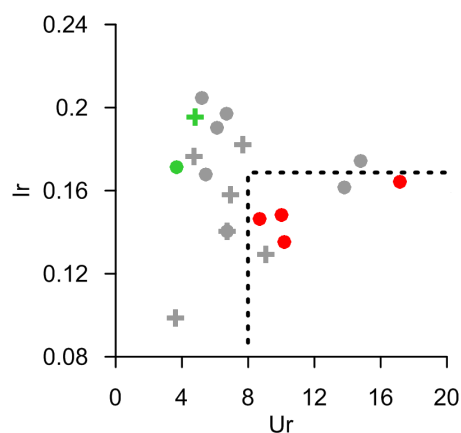
Глава 3 посвящена анализу натурных данных, полученных в ходе полевых экспериментов 2007 г. и 2016 г. В **разделе 3.1** приведен анализ влияния основных параметров волн на входе в береговую зону моря на изменение профиля подводного склона и их связь с процессами нелинейной трансформации волн. По данным полевых наблюдений аккумуляция наносов на профиле происходит при затухании волнения: уменьшении высоты, периода и крутизны волн, - как например 19-20 октября 2016 г. Наиболее существенные деформации рельефа происходят под воздействием зыби. Ветровое волнение не приводило к существенному размыву или аккумуляции. В случае умеренного ветрового волнения ($H_s \leq 1$ м, $T_p \approx 6$ с, $T_{mean} \approx 4$ с) отмечено восстановление профиля к его среднему состоянию. По данным натурных измерений подтверждается предположение, лежащее в основе прогностических литодинамических моделей: увеличение высоты волны приводит к размыву, а уменьшение – к аккумуляции. Однако утверждение в большей степени верно для волн зыби. Рост высоты ветровых волн может вызывать как незначительный размыв, так и аккумуляцию наносов на профиле. Четкой связи между скоростью деформации профиля и периодом волнения получено не было. Если рассмотреть зависимость удельного объема наносов в приурезовой части профиля, то видно, что уменьшение периода волн в целом ведет к увеличению удельного объема наносов или восстановлению подводного профиля к его среднему значению, а увеличение периода волн ведет к размыву. Эти тенденции также четче выражены для волн зыби. Однозначная зависимость между крутизной волны и изменениями профиля по данным эксперимента установлена быть не может. В то же время в инженерных моделях (например, CROSS-P) тип формирования профиля – аккумулятивный или эрозионный – определяется параметром Дина [Dean, 1973], который характеризует соотношение уровня энергии приходящих волн и размера и размера частиц наносов, слагающих берег. По данным натурных экспериментов это

предположение выполняется только для больших скоростей деформации (модуль скорости больше $1 \text{ м}^2/\text{ч}$). Система волны-рельеф показывает отрицательные обратные связи и может сама предотвращать экстремальные события. Самые высокие наблюдаемые волны вне зависимости от их типа не вызывают никаких существенных изменений в приурезовой зоне (рисунок 1-А), что обусловлено обрушением волн далеко от берега (на расстоянии $\sim 200 \text{ м}$ от берега).



Серые знаки – данные 2016 г., черные знаки – данные 2007 г., точки – волны зыби, крестики – ветровые волны

А



Скорость деформации профиля: серый – от минус 1 до $1 \text{ м}^2/\text{ч}$, красный размыв быстрее $1 \text{ м}^2/\text{ч}$, зеленый больше $1 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Б

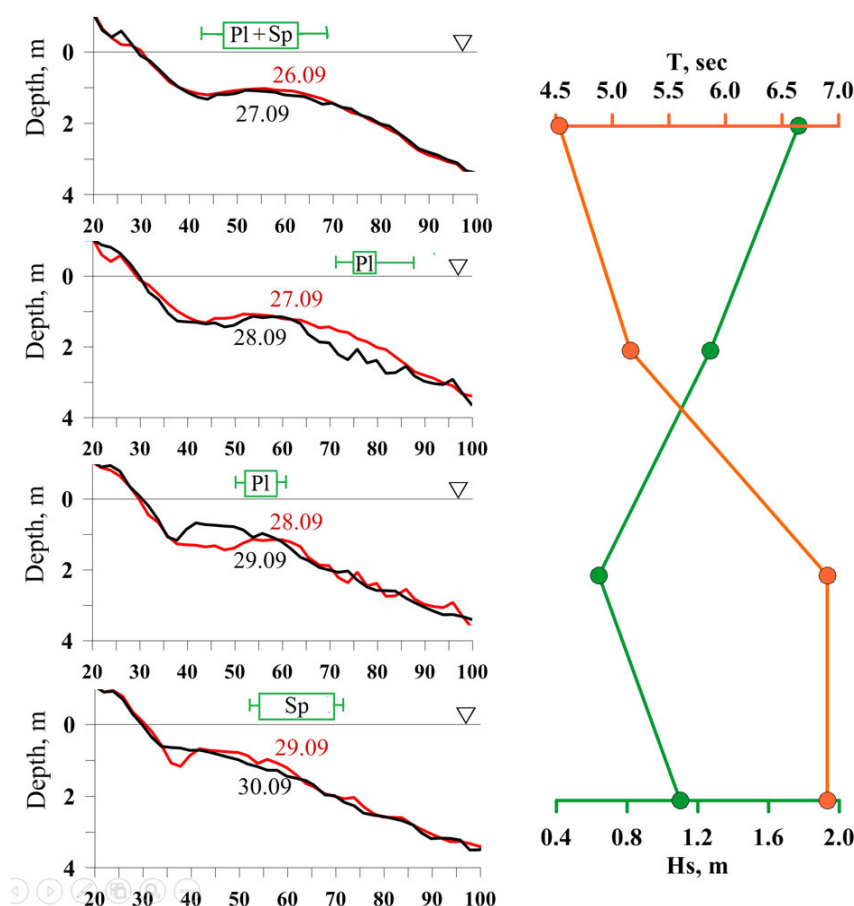
Рисунок 1 – Зависимость А) скорости отступления уреза ($\text{м}/\text{ч}$) от значительной высоты волны по данным натурных наблюдений и Б) зависимость скорость деформации от чисел Урселла и Ирибаррена по данным натурных измерений

Согласно исследованиям [Сапрыкина и др., 2013] характерные сценарии нелинейной трансформации волн в прибрежной зоне могут быть выделены на основе чисел Урселла (Ur) и Ирибаррена (I_r). Совместное использование чисел Урсела и Ирибаррена в сопоставлении со скоростью деформаций профиля (Рисунок 1-Б) показывает, что размыв происходит при значениях $Ur > 8$ и $I_r < 0.16$.

Числа Урселла и Ирибаррена совместно с крутизной волн, позволяют определить тип нелинейной трансформации волн в береговой зоне [Сапрыкина и др., 2013] в зависимости от характера обмена энергией между первой и второй гармониками. По имеющимся данным можно сделать вывод, что при значениях $I_r < 0.18$, $Ur > 8$ и $\lambda > 0.22$, соответствующих второму типу трансформации, происходит эрозия профиля песчаного пляжа.

Раздел 3.2 посвящен влиянию обрушения волн на движение донных наносов. При анализе динамики изменения профилей вдоль приурезовой части подводного

склона было замечено влияние типа обрушения волн на перераспределение наносов. Профили дна имеют более сглаженную форму, когда преобладает обрушение по типу скользящего буруна. Профили дна, измеренные при доминирующем типе обрушения ныряющего буруна, характеризуются множественными неровностями типа «волн» или «микровалов», которые присутствуют не только в верхней части профиля, но и на дальнем постоянном валу. Условия для образования вала, по данным наблюдений, возникают когда происходит (редкое) обрушение самых больших волн по типу ныряющего буруна (Рисунок 2).



Примечание: Pl – обрушение ныряющим буруном, Sp – обрушение скользящим буруном.

Рисунок 2 – Образование и движение подводного вала в приустьевой зоне и соответствующие изменения высоты (H_s , м) и периода (T , с) волн. 26-30.09.2007 г.

Неровности рельефа, созданные редким обрушением, могут провоцировать дальнейшее массовое обрушение по типу ныряющего буруна, которое поддерживает существование вала и определяет его дальнейшую эволюцию. Волны, обрушающиеся по типу ныряющего буруна, имеют сдвиг второй гармоники относительно первой на минус $\pi/2$, отрицательную асимметрию относительно вертикальной оси (A_s) и

значения асимметрии относительно горизонтальной оси (Sk) около нуля. В волнах, обрушающихся по типу скользящего буруна, сдвиг фаз равен нулю, $As=0$, $Sk \neq 0$. Симметричные относительно горизонтальной оси волны не перемещают наносов, а волны симметричные относительно вертикальной оси перемещают в сторону берега [Saprykina et.al., 2020]. Следовательно при обрушении волн по ныряющим бурунам, создаются условия, когда противотечение преобладает в месте обрушения, перемещая наносы в сторону моря, но волновой перенос до обрушения способствует смещению наносов к берегу и создаются условия для формирования подводного вала. В **подразделе 3.2.1** описан механизм движения наносов в виде «мобильных валов». Срок жизни небольших валов в приурезовой зоне составляет около 5 дней. Установлен следующий механизм образования и эволюции приурезового вала: обрушение по типу ныряющего буруна инициирует процесс образования приурезового вала, далее образовавшийся вал будет поддерживать обрушение волн того же типа, усиливая процессы взвешивания и транспорта наносов в этой области и обеспечивая условия эволюции и движения вала. Смена типа обрушения с ныряющего на скользящий бурун за счет уменьшения высоты волн на стадии затухания шторма приводит к тому, что возникший за период шторма подводный вал постепенно исчезает. После исчезновения вала профиль выравнивается и стабилизируется. Подвижные «мобильные» валы могут быть определены как особенная форма движения наносов на масштабе отдельного шторма. Когда вал присоединяется к берегу, происходит выдвигание уреза, где происходит аккумуляция наносов.

В **Главе 4** путем численного моделирования исследуется влияние спектральных параметров нерегулярного волнения на пространственное изменение рельефа дна. Численный эксперимент ставился для двумерной задачи: моделировалось воздействие волнения со значениями значительной высоты волны 1 и 1.5 м, периодом спектрального пика 7.5 и 10.5 с и углом рассеивания волновой энергии 5, 15 и 25°. Расчетная сетка для модели xBeach строилась на основе батиметрической съемки 2007 г. Расчет производится в гидростатическом нестационарном режиме. Отдельно (Дивинским Б.В.) проводилось моделирование волнения с использованием уравнений типа Буссинеска с улучшенными дисперсионными характеристиками с применением концепции роллера для моделирования обрушения. Результаты моделирования анализировались в сопоставлении с полученными деформациями рельефа. В

разделе 4.1 приведен сравнительный анализ деформации рельефа для всех комбинаций рассматриваемых волновых параметров. Переформирование рельефа происходит в плане неоднородно, наибольшая аккумуляция и эрозия наблюдаются в центральной части расчетной области (Рисунок 3). Вне зависимости от угловой ширины спектра, наибольший размыв происходил при $H_s=1.5$ м и $T_p=10.5$ с., а наименьший при $H_s=1$ м и $T_p=7.5$ с. При этом общая тенденция остается неизменной: уменьшение углового рассеяния влечет за собой увеличение площади области с измененным относительно исходного рельефа.

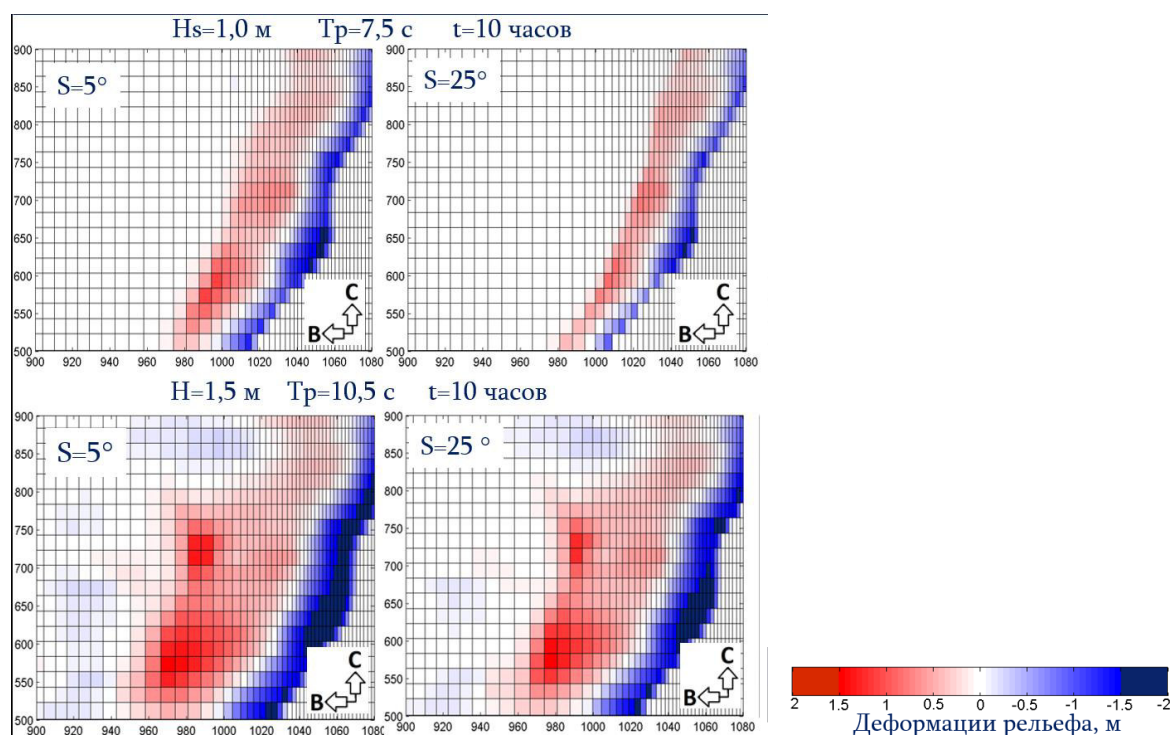


Рисунок 3 – Деформации рельефа относительно исходной батиметрии после 10-ч. волнового воздействия с параметрами $H_s=1.0$ м, $T_p=7.5$ с (сверху) и $H_s=1.5$ м, $T_p=10.5$ с (снизу) при угле рассеяния волновой энергии 5° (слева) и 25° (справа)

В **разделе 4.2** даны оценки объемов деформации и скорости стабилизации отдельных профилей, выбранных в трех районах характерных деформаций. Они различались положением вала и уклоном дна вблизи уреза (Рисунок 4). Под воздействием волнения на всех профилях происходит отступление берега и формирование пологонаклонной формы рельефа – «полки», величина которой зависит от параметров волнения. **Раздел 4.3** посвящен анализу трансформации спектра волнения над рельефом. Отмечено, что изменения спектральных параметров волн происходят похоже для всех реализаций. Характерные различия в трансформации волн

над выбранными профилями рассмотрены на примере волнения с периодом 10.5 с и высотой 1 м (Рисунок 4). Спектр волнения на профиле А характеризуется периодическим обменом энергии между высшими и низшими гармониками, а на профилях В и Pier следов периодического обмена энергией вдоль профиля нет. Однако при всех режимах волнения наблюдалось уменьшение доли энергии низкочастотной составляющей спектра волн по мере приближения к берегу.

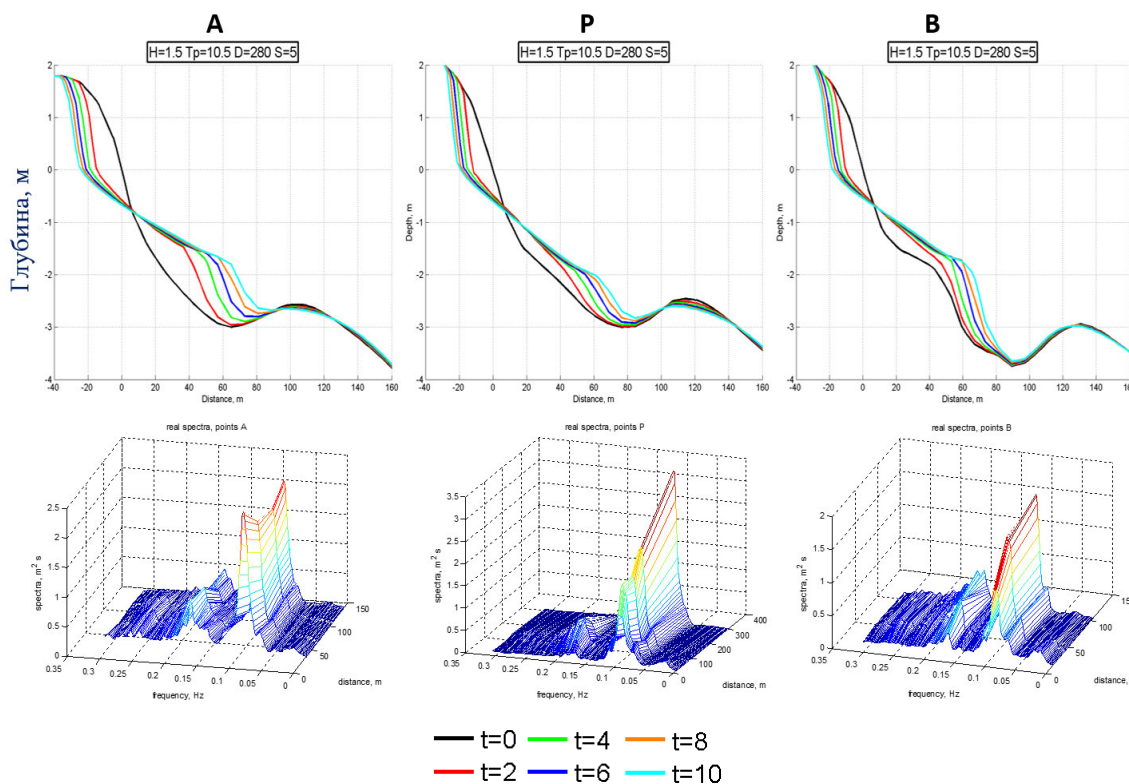


Рисунок 4 - Деформации профилей А, В и Pier через 2, 4, 6, 8, 10 ч. волнового воздействия с параметрами $H=1.5$ м, $T_p=10.5$ с при угловом рассеянии волновой энергии 5° (сверху) и характерная эволюция спектра вдоль профилей (снизу)

В разделе 4.4 приведен анализ отдельных параметров волнения и их изменения вдоль на профилях. Во всех случаях средний период волн на профиле А у берега значительно меньше, чем на профилях В и Pier (и на 40% меньше, чем входящий средний период). Уменьшение среднего периода может объясняться ростом высших гармоник при прохождении волн над валами и выделением их в виде вторичных волн после вала в достаточно протяженной межваловой ложбине. На профилях В и Pier происходит увеличение значительной высоты инфрагравитационных волн у берега (от 0.2 до 0.4 м). На профиле А увеличение значительной высоты инфрагравитационных волн существенно слабее (от 0.25 до 0.3 м). Интенсивность обрушения около берега на профиле А больше, чем на других профилях. Можно предположить, что обрушение

подавляет рост инфрагравитационных волн как за счет снижения обмена энергией между основной и низкочастотной гармоникой (при обрушении преобладает перенос энергии из основной гармоники в высокочастотные), так и возможно за счет диссипации инфрагравитационных волн.

Глава 5 посвящена изучению сезонных штормовых деформаций рельефа дна песчаного пляжа путем проведения численных экспериментов. Высота волн задавалась с использованием средних месячных значений из реанализа волнового режима для Болгарского побережья за период 1949-2010 гг. [Valchev et al., 2012]. Период волн (6 и 10 с) был выбран характерным для наиболее повторяющихся штормов в изучаемом регионе Черного моря [Справочные..., 2006]. Продолжительность штормового воздействия (21 час) задавалась исходя из критериев, предложенных в результате климатических обобщений [Belberov et al., 1992; Lozano et al., 2004]. На основе полученного изменения рельефа рассчитывались величина и скорость отступления уреза. Установлено, что сценарий штормового воздействия на берег Камчийско-Шкорпиловского пляжа, полученный по результатам расчетов, одинаков для каждого месяца года независимо от высоты и периода волнения. Максимальное отступление уреза после 21 ч. шторма происходит в январе-марте (высота волн 1.7–1.8 м) и составляет в среднем 18 м для волнения с периодом 10 с. Наименьшие деформации приносят летние шторма: в июне-августе, когда среднее месячное волнение не превышает 1 м: в среднем по профилю составило 10 м, на отдельных профилях до 20 м. При волнении с 6 с периодом урез на профиле в среднем отступал на 5 м, а в некоторых точках наблюдалось его выдвижение в сторону моря (Рисунок 5).

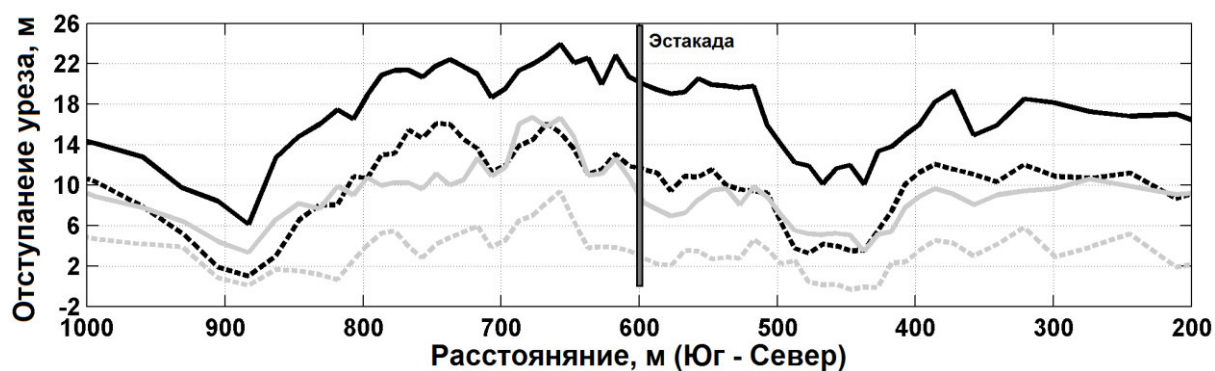


Рисунок 5 – Отступление уреза в феврале (черная линия) и июне (серая линия) при волнении с периодом 6 (пунктир) и 10 с (сплошная)

На деформации рельефа в прибрежной зоне оказывают влияние, как высота, так и период волн. Высота волн влияет на абсолютную величину размыва, а период на величину размыва и на скорость стабилизации штормового профиля. Так при волнении с периодом 6 с, независимо от высоты волн, средняя скорость отступления береговой линии практически приближается к нулю и перестает изменяться через 4–6 часов, при периоде 10 с – через 10–12 ч. Изменения рельефа зависит не только от режима волнения, но и от рельефа дна. Наименьшие изменения береговой линии, слабо зависящие от высоты и периода волн, происходят над подводными профилями дна, форма прибрежной части которых близка к теоретическому профилю равновесия Дина. Показано, что на основе данных о значительных высотах волн возможна только качественная оценка тенденций изменения рельефа дна береговой зоны, например, характеризующая общий сценарий изменений. Для любых количественных оценок, в том числе для скоростей выработки профиля равновесия, максимальных и минимальных объемов деградации пляжа, необходимо знать период волнения и эволюцию продолжительности штормовой активности.

В **Главе 6** рассмотрено влияние рельефа дна на трансформацию волнения в береговой зоне и связанное с этим движение уреза. В исследованиях, описанных в **Главах 4 и 5**, установлено, что в зависимости от положения и формы подводного вала волны трансформируются над ним по-разному, в следствие чего происходит разное воздействие волнения на рельеф дна и пляжа. Для изучения того, как именно положение вала влияет на берег, был поставлен численный эксперимент, в котором волны с одинаковыми параметрами в открытом море (значительная высота волнения 1.5 м, период спектрального пика 10.5 с) проходили над профилем с разным положением подводного вала и над контрольным профилем без вала. Медианный диаметр наносов принята $D_{50}=0.2$ мм для всего профиля. С приближением вала к берегу (и уменьшением глубины над ним), размыв уреза увеличивался, а толщина слоя аккумуляции наносов мористее на профиле уменьшалась, расстояние выноса наносов в сторону моря возрастало. Ни на одном профиле не происходило выноса наносов мористее подводного вала. По сравнению с контрольным профилем (без вала) обнаружено: а) профиль с самым дальним расположением вала (относительное расстояние от берега 0.82 длины волны) будет уменьшать отступление уреза; б) профиль с самым близким положением вала (относительное расстояние от берега

0.42 или менее половины длины волны) наилучшим образом «работает», как барьер против выноса пляжевого материала в море. Размыв уреза и трансформация рельефа в модели наравномерны во времени. Максимальная скорость отступления для всех профилей – в первый час воздействия: 4.5–6.5 м/ч. Со временем интенсивность размыва снижалась. После 6 ч. воздействия волн профиль пляжа адаптировался к заданному режиму и принимал относительно равновесное состояние, при котором скорость отступления уреза для всех профилей равнялась ≈ 0.5 м/ч. Независимо от исходного рельефа на всех профилях формируется подводная терраса, представляющая равновесный профиль, близкий к теоретическому профилю Дина, рассчитанному для пляжа, сложенного песком с диаметром 0.2 мм [Grasso et al., 2009]. Установлено, что на отступление берега влияет средний период волн и величина инфрагравитационных волн. Показано, что чем меньше средний период и больше высота инфрагравитационных волн, тем меньше отступление уреза (Рисунок 6 А-Б). Такое изменение параметров волнения происходит на профиле с валом, наиболее удаленном от уреза (0.82 от длины волны).

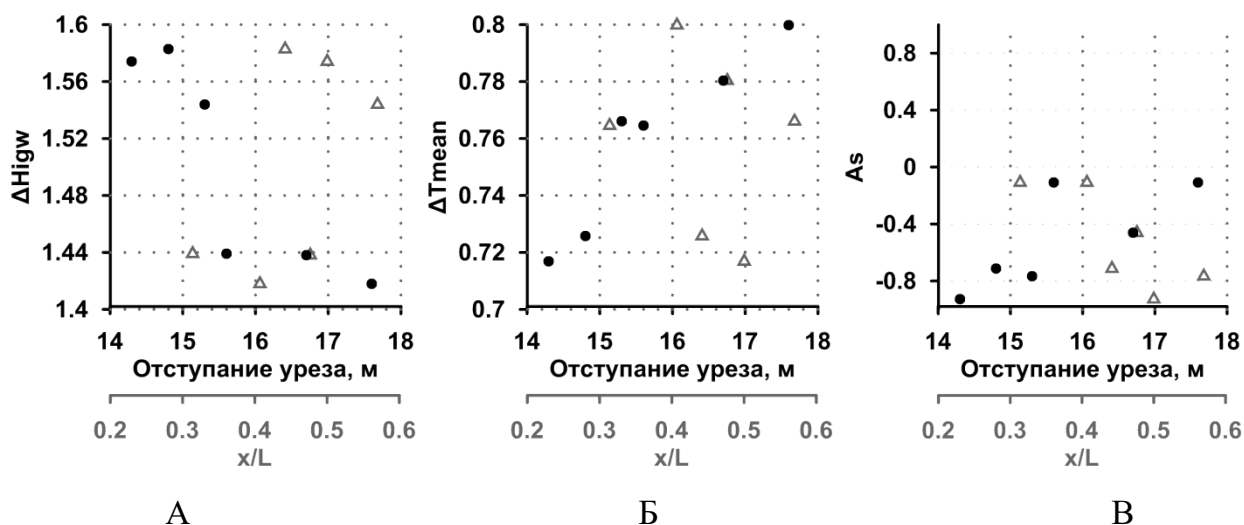


Рисунок 6 – Зависимость отступления уреза (точки) и относительного расстояния выноса наносов, x/L (треугольники) от относительного изменения параметров волнения при трансформации волн в береговой зоне: А) значительной высоты инфрагравитационных волн (H_{igw} , м), Б) среднего периода волнения (T_{mean} , с) и В) асимметрии волн (A_s) относительно вертикальной оси

Вынос наносов в море зависит от значительной высоты волн основной частоты: чем больше высота, тем дальше выносятся материал. Наличие стабильного подводного вала меняет симметрию волн. Для всех профилей симметрия волн относительно

горизонтальной оси бережное вала остается практически одинаковой (~1.6). Асимметрия волн относительно вертикальной оси изменяется сильнее. Чем более асимметричные волны подходят к берегу, тем меньше размыв пляжа (Рисунок 6 В). Наиболее асимметричные волны бережное вала наблюдаются на профилях, где первое обрушение волн происходит между урезом и валом, а также на профиле без вала. При расположении вала ближе к берегу и уменьшении глубины над ним, обрушение волн происходит как на вершине вала, так и вблизи берега. Наличие двух точек обрушения приводит к большему отступанию линии уреза. Исключение составляет профиль, где вал расположен на самом близком расстоянии к урезу. Потери песка в море, как и отступление уреза при этом несколько уменьшается. На основе анализа результатов эксперимента получены рекомендации для оптимального расположения искусственных подводных валов в целях берегозащиты.

В **Заключении** приведены основные результаты проведенных исследований:

1. На основе анализа данных полевых и численных экспериментов, подтверждено, что наиболее важный параметр, определяющий деформации рельефа прибрежной зоны на всех временных масштабах – высота волн. Установлено, что зависимость деформаций рельефа дна от периода волн наблюдается только на масштабах нескольких часов – в первые часы – шторма. Показано, что зависимость изменений рельефа дна от крутизны подходящих волн выражена в меньшей степени, однако наблюдается зависимость от параметра Дина, который содержит в себе крутизну волны.
2. Выяснено, что при нормальном (перпендикулярном) подходе волн к берегу увеличение высоты волны, периода и уменьшение угла рассеяния волновой энергии приводит к интенсификации переработки рельефа. Показано, что высота значительных волн находится в прямой зависимости с абсолютной величиной размыва и расстоянием выноса наносов в море, а период спектрального пика влияет на величину размыва и на скорость стабилизации штормового профиля.
3. По данным наблюдений обнаружено, что нелинейная трансформация волн оказывает существенное влияние на деформацию рельефа прибрежной зоны и берега. Выяснено, что при сценарии нелинейной трансформации волн, характеризующемся наличием явно выраженного пика второй гармоники в пределах прибрежной зоны, определяемом по сочетанию чисел Иррибаррена и

Урселла, и преобладанием в трансформации нелинейных процессов над диссипацией (высокие значения числа Урселла), происходит эрозия берега.

4. Показано, что транспорт наносов во время шторма к берегу происходит путем формирования мобильных подводных валов. При развитии шторма обрушающиеся волны формируют на подводном склоне такой вал, который в стадии стабилизации шторма поддерживается обрушающимися на нем волнами и одновременно препятствует существенному выносу материала мористее его расположения, а при изменении волновых условий и затухании шторма мигрирует и полностью примыкает к берегу, формируя плоскую террасу, профиль которой близок к классическому теоретическому профилю равновесия.
5. На основе анализа полевых данных доказано, что основной процесс в переформировании профиля подводного склона и формировании подводных структур – обрушение волн. Показано, что важно не только положение и интенсивность обрушения, но также его тип, поскольку он влияет на изменение асимметрии волн, что в свою очередь определяет направление движения наносов. Симметрия определяется амплитудой высших гармоник и сдвигом фаз между ними. Волны, обрушающиеся по типу ныряющего буруна имеют пилообразную форму, в отличие от симметричных относительно вертикальной оси волн, обрушающихся типом скользящего буруна.
6. В результате численных экспериментов выяснено, что максимальные деформации рельефа наблюдаются в первые часы волнового воздействия, после чего скорости изменений замедляются и постепенно выходят на квазистационарный уровень (выработка профиля равновесия).
7. Показано, что вдольбереговая неоднородность деформаций рельефа при штормовом воздействии связана с формой подводного профиля. Если вал расположен под углом к берегу, то отступление уреза при нормальном подходе волн к берегу будет неравномерным (могут возникать пляжевые фестоны). Отступление уреза при трансформации волн над подводными валами зависит от изменения асимметрии волн, среднего периода и генерации связанных инфрагравитационных волн при прохождении волн над ними. Чем больше асимметрия волн относительно вертикальной оси после бара, тем меньше отступление уреза. Уменьшение среднего периода волнения, связанное с ростом высших нелинейных гармоник при

прохождении волн над валом, уменьшает размыв берега.

8. Выяснено, что вал является защитой берега, если он находится на определенных расстояниях от берега. 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 минимален и меньше, чем на профиле без вала.
9. На основании анализа данных моделирования сделан вывод, что 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.
10. По данным численных экспериментов продемонстрировано, что подводный вал также является естественным барьером, задерживающим наносы в береговой зоне. Материал, смытый из приурезовой части пляжа, не выносится мористее вала. При расположении вала от уреза на расстоянии менее половины длины подходящих волн на глубокой воде, он будет максимально эффективно удерживать песок близ берега.

Тема диссертационного исследования является актуальной и перспективной для дальнейшего развития. В будущем получение большего объема полевых данных с высоким временным разрешением позволило бы рассмотреть более широкий спектр волновых условий и, возможно, лучше оценить роль типов трансформации волнения и более подробно описать деформации рельефа для всех сценариев трансформации. Несомненно важно также и прикладное значение работы. Развитие темы берегозащиты, затронутое в диссертации, можно было бы осуществить, рассматривая ситуации с наличием нескольких валов или валов разной конфигурации, учесть пространственную неоднородность наносов, слагающих береговую зону.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня Web of Science:

1. Saprykina Ya.V., Kuznetsov S.Yu., **Kuznetsova O.A.**, Shugan I.V., Chen Yang-Yih. Wave breaking type as a typical sign of nonlinear wave transformation stage in coastal zone // Wave Phenomena journal. – 2020. – Vol. 28. - №1. - P. 75-82. (Импакт-фактор 0.745, WoS Q4, Scopus Q3)

2. **Kuznetsova O.**, Saprykina Ya. Influence of Underwater Bar Location on Cross-Shore Sediment Transport in the Coastal Zone // Journal of Marine Science and Engineering. – 2019. – Vol. 7. – № 3. – P. 55. (Импакт-фактор 1.732, WoS Q2, Scopus Q2)

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня Scopus:

3. **Кузнецова О.А.**, Сапрыкина Я.В. Моделирование изменчивости песчаного пляжа при взаимодействии волн с подводным валом // Геоморфология. – 2019. – №3. С. 57-67. (Импакт-фактор 0.206, Scopus Q4, ВАК, РИНЦ)

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня РИНЦ:

4. **Кузнецова О.А.**, Сапрыкина Я.В. Внутригодовые вариации штормовых деформаций рельефа дна песчаного побережья на примере Камчийско-Шкорпиловского пляжа (Черное море, Болгария) // Процессы в геосредах. – 2017. – №1. – С. 435-444.
5. Сапрыкина Я.В., **Кузнецова О.А.** Влияние трансформации волн над особенностями подводного рельефа дна на отступление береговой линии во время шторма // Процессы в геосредах. – 2017. – № 4. – С. 710-716.
6. **Кузнецова О.**, Сапрыкина Я., Трифонова Е. Экспериментальные исследования влияния волнения на деформации рельефа дна береговой зоны моря // Процессы в геосредах: сборник научных статей. – Москва: ИПМех РАН, 2015. – С. 75-81.

Участие в коллективной монографии:

7. Сапрыкина Я.В., Корзинин Д.В., Штремель М.Н., Дивинский Б.В., **Кузнецова О.А.**, Коваленко А.Н. Трансформация волн над особенностями подводного рельефа дна в применении к методам защиты берегов. – Москва: Onebook, 2018, 164 с. (РИНЦ)

Опубликованные тезисы докладов:

8. Saprykina Yana, **Olga Kuznetsova**. Influence of wave transformation processes on evolution of underwater beach profile // Proceedings of the 36th International Conference on Coastal Engineering (30.07-03.09.2018, Baltimore, USA). – 2018. – Vol. 1. – P. 65. (WoS, Scopus)
9. Kuznetsov Sergey, Yana Saprykina, Margarita Shtremel, **Olga Kuznetsova**. Spectral structure of breaking waves and its influence on the transport of sediments in coastal zone // Proceedings of Conference OCEANS'15 MTS/IEEE (18-21.05.2015, Genova, Italy) – 2015. – Vol. 1. – P. 1-6. (WoS, Scopus, РИНЦ)

10. Saprykina, Y., Divinskii, B., **Kuznetsova, O.**, Korzinin, D. Transformation of waves over the system of artificial submerged reefs // Proceedings of 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (31.10-04.11.2017, Mellieha, Malta). – 2017. - Vol. 2 – P. 955-966. (Scopus)
11. **Kuznetsova O.**, Saprykina Ya., Shtremel M., Kuznetsov S., Korzinin D. [et al.] Dynamics of sandy beach in dependence on wave parameters // Proceedings of IMAM2017 Conference: Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources. 2017 (09-11.10.2017, Lisbon, Portugal). – 2017. – Vol. 2. – P. 1075-1079. (Scopus)
12. Сапрыкина Я.В., **Кузнецова О.А.** Влияние особенностей подводного рельефа дна на транспорт наносов в береговой зоне моря // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Третья международная школа молодых ученых. – 2017. – С. 185-187. (РИНЦ)
13. **Кузнецова О.А.**, Андреева Н., Корзинин Д.В., Кузнецов С.Ю., Трифонова Е., Сапрыкина Я.В., Штремель М.Н. Взаимоподстройка волн и рельефа по данным натурных экспериментов "Шкорпиловцы" 2007 И 2016 гг. // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых (10-15.04.2017, Москва, Россия). – 2017. – С. 137-138. (РИНЦ)
14. **Kuznetsova O.**, Andreeeva N., Korzinin D., Kuznetsov S., Saprykina Ya., Trifonova E., Shtremel M. Self-organising of wave and beach relief in storm: field experiments // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly (23-28.04.2017, Vienna, Austria). – 2017a. – Vol. 19. – P. EGU2017-2568.
15. **Kuznetsova O.**, Saprykina Ya., Divinsky B. Underwater barred beach profile transformation under different waves conditions // Proceedings of International Conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world" (22-27.08.2016, St.-Petersburg, Russia). – 2016. – P. 28. (Scopus, РИНЦ)
16. **Kuznetsova O.**, Saprykina Ya., Trifonova E. Wave impact on changes of underwater profile of barred beach // Proceedings of the Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST 2015 (06-10.10.2015, Varna, Bulgaria). – 2015. – P. 891-899. (Scopus, РИНЦ)