

На правах рукописи

Штремель Маргарита Николаевна

**КЛАССИФИКАЦИЯ БЕРЕГОВЫХ ЗОН МОРЯ ПО ТИПУ
РЕАКЦИИ ПЕСЧАНОГО ДНА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛН
(НА ПРИМЕРЕ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ
БОЛГАРИИ)**

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:

Доктор физико-математических наук **Кузнецов Сергей Юрьевич**

Официальные оппоненты:

Показеев Константин Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор (Отделение геофизики, Физический факультет) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

Кабатченко Илья Михайлович, доктор географических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории ветрового волнения Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова»

Ведущая организация:

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

Защита состоится « ... » 2021 г. в часов минут 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.dissert.ocean.ru> Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Автореферат разослан «...» 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Соловьев Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Волны являются основным агентом рельефообразования в береговой зоне моря. Вопрос, почему одни волновые режимы приводят к размыву берегов, а другие, напротив, к их восстановлению, волнует не только ученых, занимающихся фундаментальными исследованиями, но и береговых инженеров.

Традиционно профили подводного берегового склона разделяются на аккумулятивные и профили размыва по морфологическим признакам: профили размыва характеризуются формированием подводного вала и размывом около уреза, аккумулятивные – выполаживанием подводного склона и формированием бермы («berm»). В настоящее время существует множество эмпирических зависимостей формы профиля подводного берегового склона от параметров волнения, уклона дна и свойств материала, которым оно сложено. Например, в работе Р. Дина на основе данных физического лабораторного эксперимента показано, что крутые волны формируют профиль размыва, а пологие – аккумулятивный, однако не предлагается физической интерпретации этого факта.

С другой стороны, разработано большое количество численных морфодинамических моделей, основанных на уравнениях гидродинамики и транспорта наносов, позволяющих воспроизвести изменения рельефа дна под воздействием конкретного волнового режима: ROMS, DELFT3D, ECOM-SED, SEDTRANS, STORMSED, XBEACH... Они предназначены для детального предсказания перестройки рельефа дна под действием трансформирующихся волн, весьма чувствительны к значениям начальных и граничных условий и, по-видимому, из-за этого до сих пор не использованы ни для построения новых эмпирических фундаментальных зависимостей рельефа дна от параметров волн, ни для физического обоснования уже эмпирически выясненных закономерностей формирования профиля подводного берегового склона.

В работах Дж. Бейларда показано, что транспорт наносов, характеризующий воздействие волн на рельеф дна, зависит от асимметрии волновых скоростей. Асимметрия волн определяется процессами их нелинейной трансформации при распространении в береговой зоне.

Цель данной работы - получить новые сведения о нелинейной трансформации волнения в береговой зоне моря, выяснить их влияние на транспорт наносов и на этой основе разработать критерий уязвимости рельефа береговых зон к волновому воздействию, разделяющий сценарии аккумуляции или размыва подводного склона, который, с одной стороны, был бы простым и требовал бы минимума информации о береговой зоне и режиме волнения, а с другой стороны был основан на физических механизмах нелинейной трансформации волн и транспорта наносов.

Для достижения означенной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ текущего состояния изученности нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря, его влияния на транспорт наносов и, как следствие, на изменения профиля дна, а также существующих классификаций береговых зон;

2. Выявление особенностей трансформации волнения в береговой зоне моря на основе обработки данных натуральных и лабораторных экспериментов;
3. Разработка параметризаций положения, максимального значения амплитуды второй гармоники и пространственного периода обмена энергией между гармониками, позволяющих получить численные оценки характеристик трансформации волн в береговой зоне;
4. Создание методики оценки уязвимости берегов к волновому воздействию;
5. Применение разработанной методики для классификации берегов Болгарии по типу уязвимости к волновому воздействию.

Научная новизна работы. Установлены параметры волн и подводного склона, при которых реализуется сценарий периодического по пространству обмена энергией между основной и высшими гармониками. На основе данных натуральных, лабораторных и численных экспериментов были получены зависимости, позволяющие предсказывать параметры периодического обмена энергией между гармониками: длину пространственного периода обмена, максимальную амплитуду, которой достигает вторая гармоника, а также закономерности эволюции сдвига фаз между первой и второй гармониками на разных стадиях периодического обмена. На основе этих зависимостей была разработана методика, позволяющая определить, будет ли происходить намыв или размыв пляжа при заданном режиме волнения. Новизна методики заключается в учете эффектов нелинейной трансформации волнения при расчете транспорта наносов. Эта методика была применена для оценки уязвимости береговых зон Болгарии к волновому воздействию.

Защищаемые положения:

1. Показано, что пространственные флуктуации амплитуд высших волновых гармоник определяются наличием расстройки по волновым числам в окolorезонансных трехволновых взаимодействиях, приводящих к росту высших нелинейных гармоник волн. Наличие расстройки по частотам в экспериментальных данных не подтверждается.
2. Установлено, что пространственный период обмена энергией между основной и второй кратной волновыми гармониками может быть предсказан исходя из дисперсионного соотношения линейной теории при относительных глубинах более $0.05 h/L$ и исходя из нелинейного дисперсионного соотношения при меньших глубинах.
3. Показано, что в береговой зоне может наблюдаться несколько пространственных периодов обмена энергией между основной и второй

гармониками волнового движения. Установлено, что положение максимума амплитуды второй гармоники при условии реализации периодического обмена энергией определяется как 1.5 длины пространственного периода обмена энергией между гармониками, отсчитанные от уреза.

4. Показано, что нелинейные процессы трансформации волн, проявляющиеся в виде роста и затухания нелинейных гармоник и одновременного изменения сдвига их фаз, определяют реализацию размыва или аккумуляции в береговой зоне моря.
5. Создана методика оценки уязвимости береговых зон к волновому воздействию, основанная на балансе волновой компоненты расхода наносов и компоненты, вызванной противотечением. Для применения методики необходимо знать высоту и период волн, уклон дна и медианную крупность донных отложений.

Достоверность научных результатов и выводов работы. Данные о возвышении свободной поверхности, использованные в работе, получены с помощью широко применяющихся в мировой практике емкостных волнографов, позволяющих зафиксировать возвышение свободной поверхности с высокой дискретностью (5–20 Гц). В ходе полевого и лабораторных экспериментов использовалось от 15 до 20 датчиков, что позволило зарегистрировать пространственные изменения поля волн. Подробный анализ натуральных данных проводился с применением апробированных программ обработки и визуализации.

Практическая значимость исследования. Разработанная методика позволит определить, будет ли берег устойчив к определенному режиму волнения, или будет происходить размыв пляжа и вынос донных осадков к мористой границе береговой зоны моря, где транспорт наносов, вызванный волновыми движениями воды, прекращается, на основе малого количества исходных параметров (высоты волн на глубокой воде, периода волн, среднего уклона дна и значения гранулометрического состава донных осадков), причем для первичной оценки возможно ограничиться знанием только первых трех параметров, получить которые возможно практически для любого берега.

Личный вклад автора. Соискателем проводилась обработка и анализ архивных данных натурального и лабораторных экспериментов, проводившихся в Лаборатории шельфа и морских берегов до присоединения соискателя к коллективу: «Шкорпиловцы-2007», «Сочи-2004».

Также было принято участие в подготовке, реализации и обработке данных лабораторного эксперимента по изучению трансформации волн над наклонным дном «Сочи-2013», проводившегося в гидравлическом лотке НИЦ «Морские берега».

Проведен самостоятельный лабораторный эксперимент по изучению трансформации волн на промежуточной и мелкой воде «Сочи-2015» в гидравлическом лотке НИЦ «Морские берега».

Поставлен численный эксперимент с использованием гидродинамической модели SWASH.

За время работы над диссертацией соискателем было принято участие в 8 проектах РФФИ и РНФ.

Было осуществлено руководство двумя проектами РФФИ:13-05-90775 «Трехволновые околорезонансные нелинейные взаимодействия при трансформации волн в береговой зоне моря: условия реализации и границы существования» и 14-05-31058 «Классификация береговых зон Балтийского моря по типу деформаций рельефа дна, вызванных волнением», а также был самостоятельно выполнен проект под руководством В.В. Фомина 16-35-50064 «Прямые и обратные связи в системе волны – рельеф дна береговой зоны моря».

Теоретические результаты, полученные автором лично. Существуют теории эволюции волн на промежуточной глубине, характеризующиеся наличием резонанса в трехволновых взаимодействиях только либо по частотам, а по волновым числам – наличием расстройки, либо, наоборот, полный резонанс наблюдается по волновым числам и расстройка – по частотам. На основе анализа экспериментальных данных было показано, что расстройка по частоте мала либо отсутствует. Проявления наличия расстройки по волновым числам - периодические в пространстве изменения формы профиля волны - предсказываются линейным дисперсионным соотношением на промежуточной глубине.

Также было установлено, что пространственная периодичность обмена энергией между основной и высшими гармониками, определяемая как расстояние, на котором амплитуда второй гармоники растет от 0 до максимума и вновь затухают до 0, может быть оценена на основе линейного дисперсионного соотношения для промежуточной глубины и нелинейного, учитывающего крутизну волн – для мелкой воды.

Все полученные в ходе работы сведения о нелинейной трансформации волн были собраны автором в единую методику, позволяющую оценить уязвимость береговых зон к волновому воздействию.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены соискателем лично на 7 конференциях (6 международных и 1 российской конференции) в виде устных и стендовых докладов: Waves In Shallow Environment (WISE 2013), Колледж Парк, Мэриленд, США, 2013, EGU 2014, Вена, Австрия, 2014, Coastlab14, Варна, Болгария, 2014, International Geographical Union (IGU 2015), Москва, 2015, 16th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean IMAM 2015 - Towards Green Marine Technology and Transport, Пула, Хорватия, 2015, Waves In Shallow Environment (WISE 2016), Венеция, Италия, 2016, EMECS'11 Sea Coasts XXVI, Санкт-Петербург, 2016, Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова, Севастополь, 2015, XXVII научная сессия Совета по нелинейной динамике, Москва, Россия. Также работа была представлена на двух семинарах по международному проекту BS STEMA и многократно обсуждалась на семинарах Лаборатории, а также на двух семинарах

АО ИО РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 2 статьи в журнале *Океанология*, рекомендованном ВАК.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю Сергею Юрьевичу Кузнецову за обучение, руководство, всестороннюю помощь и поддержку в написании данной работы, Яне Владимировне Сапрыкиной за ценные советы и конструктивную критику, коллективу Лаборатории шельфа и морских берегов им. В.П. Зенковича за интерес к работе и мотивирование к ее завершению и супругу Александру Олеговичу Рахману за моральную и техническую поддержку.

Структура и объем работы. Диссертационная работа выполнена в Лаборатории шельфа и морских берегов им. В.П. Зенковича Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Объем работы составляет 97 страниц. Диссертация включает в себя 32 рисунка и 4 таблицы. В работе цитируются 100 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится описание места данного исследования в современной системе научного знания, актуальности проблемы, которой посвящена диссертационная работа. Сформулирована цель и задачи работы. Приведены защищаемые положения.

Глава 1 посвящена обзору современного состояния исследуемой проблемы. Приведены сведения об актуальных моделях транспорта наносов, особенностях трансформации волн в береговой зоне моря, современные гипотезы о происхождении подводных валов, существующие критерии реализации процессов эрозии и аккумуляции в береговой зоне под действием волн.

1.1 Модели транспорта наносов

Воздействие волн на переформирование рельефа дна береговой зоны моря численно выражается в формулах для вычисления расхода наносов. Энергетический подход к оценке транспорта донных осадков волнами является на сегодняшний день наиболее распространенным. Для работы была выбрана формула Бейларда как сравнительно простая, однако позволяющая учесть вклад исследуемых эффектов трансформации волнения в изменения рельефа дна:

$$q \approx \overline{U|U|^2} + \overline{U|U|^3}, \quad (1)$$

где третий и четвертый нечетные моменты горизонтальных скоростей движения воды, вызванных волнением, $(\overline{U|U|^2}, \overline{U|U|^3})$ зависят от амплитуд гармоник придонных скоростей движения воды $(u_1, u_2$ где $u_m = a_m \omega / \sinh kh$, a_m - амплитуды гармоник, $m = 1, 2, \dots$ - номер гармоники, ω - круговая частота, k - волновое число, h - глубина), сдвига фаз φ между ними и скорости противотечения \bar{u} следующим образом:

$$\overline{U|U|^2} = \frac{3}{4} u_1^2 u_2 \cos \varphi + \frac{3}{2} u_1^2 \bar{u} \quad (2)$$

$$\overline{|U|^3} = \frac{16}{5\pi} u_1^3 u_2 \cos \varphi + \frac{16}{3\pi} u_1^3 \bar{u}. \quad (3)$$

Из формул 1 - 3 следует, что при нулевых значениях амплитуды второй гармоники, а также при сдвиге фаз, равном по модулю $\pi/2$, направленный к берегу транспорт наносов отсутствует и преобладает направленный от берега транспорт наносов, вызванный противотечением. Структура и свойства противотечения в данной работе не рассматриваются, его расчета используется существующая формула (Rattanapitikon, Sibayama, 2001). Основное внимание в работе сосредоточено на оценке волновой компоненты расхода наносов, для чего необходимо рассмотреть эволюцию амплитуд гармоник и сдвига фаз между ними.

1.2 Трансформация волн в береговой зоне моря: трехволновые околорезонансные взаимодействия

Несмотря на общепризнанный факт важности трехволновых околорезонансных взаимодействий, периодичность обмена энергией между гармониками волнового движения не принимается во внимание и не учитывается в существующих моделях. В данной работе будет показано, что периодический обмен играет определяющую роль в изменениях рельефа дна береговой зоны моря.

1.3 Отражение эффектов нелинейной трансформации волн в морфодинамике береговой зоны моря: подводные валы

Волновой транспорт наносов приводит к возникновению подводных валов и их перемещению вдоль профиля подводного склона. Однозначного мнения по поводу механизма формирования валов на данный момент не существует. Одна из гипотез связывает появление подводных валов с периодическим изменением симметрии волн, вызванным трехволновыми околорезонансными взаимодействиями между гармониками волнового движения

1.4 Критерии реализации процессов эрозии или аккумуляции в береговой зоне под действием волн

Наличие и отсутствие подводных валов ассоциируется с типом профиля подводного склона: профиль размыва характеризуется наличием подводного вала, а аккумулятивный – отсутствием. Для разделения этих двух типов профилей предложены эмпирические критерии, в основе которых лежат такие параметры как высота и период волн и крупность донных осадков. Однако, в этих критериях физические механизмы размыва и аккумуляции на профиле не отражены. Существует необходимость создания критерия, основанного на учете вклада процессов нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря в ее морфодинамику.

В **Главе 2** приводится описание исходных данных и методов исследований.

В работе использовались данные, полученные в ходе натурального, двух лабораторных и численного экспериментов по изучению трансформации волн и морфодинамических процессов в береговой зоне моря.

Полевой эксперимент проводился на черноморском побережье Болгарии к югу от города Варна около поселка Шкорпиловцы (42.96 с.ш., 27.9 в.д.).

Район наблюдений располагается на прямолинейном участке берега суб-меридионального простирания – Камчийско-Шкорпиловецком песчаном пляже, являющимся самым протяженным на всем болгарском побережье. Он располагается между двумя скалистыми мысами: Иланджик и Черный нос, начинаясь в 2 км к северу от устья р. Камчия и заканчивается в 2.5 км к югу от устья р. Фандаклийска. Его длина составляет 12.4 км, средняя ширина – 25 м. Профиль подводной части береговой зоны Шкорпиловецкого пляжа характеризуется наличием серповидного подводного вала, сложенного среднезернистым песком ($D_{50} = 0.35$ мм). На момент проведения эксперимента вершина вала располагалась на расстоянии около 110 м от берега, Относительная высота вала - 1 м. Средний уклон профиля более 0.02. Наклон в прибойной зоне (0.036) зависит от геоструктурных особенностей подводного рельефа, в то время как в зоне трансформации волнения (наклон 0.026) - от аккумулярованного песчаного материала в верхней части и наличия песчаного вала.

Натурный эксперимент «Шкорпиловцы-2007» проводился в сентябре – октябре 2007 года. В ходе эксперимента на исследовательской эстакаде были установлены 15 струнных волнографов: 7 емкостных датчиков и 8 датчиков сопротивления. Частота опроса датчиков составляла 5 Гц. Длина измеренных серий составляла от 20 минут до 1 часа. Всего за время эксперимента было получено 65 записей волнения. Параллельно измерению волнения дважды в сутки с помощью алюминиевого лота осуществлялись промеры рельефа дна вдоль эстакады с пространственным шагом 2 м. Визуально фиксировалось состояние поверхности моря, положение областей обрушения волн.

Лабораторные эксперименты «Сочи-2013» и «Сочи-2015» проводились в гидравлическом лотке НИЦ «Морские берега», г. Сочи. Гидравлический лоток длиной 22 м, шириной 0.6 м и глубиной 1 м оснащен щитовым волнопродуктором, генерирующим регулярные (псевдомонохроматические) волны. Целью экспериментов было изучение трансформации волн над плоским и наклонным дном различного уклона.

В ходе эксперимента 2013 года исследовалось распространение волн над двумя уклонами дна: пологим (0.02) и крутым (0.04). Возвышение свободной поверхности регистрировалось 14 датчиками с частотой опроса 20 Гц. Всего было воспроизведено 66 режимов волнения в диапазоне высот волн от 2 до 30 см и периодов от 1 до 11 с.

В 2015 году было установлено 18 емкостных датчиков, регистрировавших возвышение свободной поверхности с частотой 20 Гц. Глубина над плоской частью дна варьировалась в диапазоне от 30 до 60 см. Параметры волн менялись в диапазоне высот волн от 6 до 22 см и периодов от 1.4 до 3 с. Всего был воспроизведен 31 режим волнения.

Численный эксперимент проводился с помощью гидродинамической модели SWASH («Simulating WAVes till SHore», <http://swash.sourceforge.net/>),

предназначенной для расчета трансформации волн при их распространении с глубокой воды в сторону берега, а также быстро изменяющихся течений в прибрежной зоне.

В ходе численного эксперимента воспроизводилось распространение монохроматических волн на постоянной глубине. Диапазон глубин составлял от 2 до 7 м, периодов – от 6 до 9 с, высота волн – 1 м, длина моделируемой области – 250 м. Вывод расчетного параметра – возвышения свободной поверхности – осуществлялся в 50 точках (с шагом 5 м) 10 раз в секунду.

Глава 3 посвящена исследованию условий реализации периодического обмена энергией между гармониками в береговой зоне моря.

Трансформируясь в береговой зоне моря, волны изменяют свою форму вследствие околорезонансных трехволновых взаимодействий, приводящих к периодическому росту и затуханию высших гармоник.

Изменения симметрии волн, вызванные периодическим обменом энергией между основной и высшими гармониками волнового движения, приводят к возникновению коротковолновой компоненты поперечного транспорта наносов и её эволюции вдоль профиля подводного склона, что приводит к тем или иным морфодинамическим последствиям: образованию подводного вала, размыву или намыву пляжа.

Анализ данных натурного эксперимента показал, что в береговой зоне периодический обмен энергией между основной и второй кратной гармониками в той или иной мере существует всегда, и было выделено два характерных сценария эволюции первых и вторых гармоник:

1. внутри береговой зоны наблюдается ярко выраженный полный период обмена энергией между гармониками, при котором амплитуда второй гармоники достигает максимума;
2. амплитуда второй гармоники не имеет ярко выраженного максимума, слабо меняется во всей береговой зоне;

Установлено, что в качестве критерия для разделения этих двух сценариев может быть использовано число Иррибаррена в следующем виде: если $I_r > 7H/L$, где H/L – крутизна волн на входе в береговую зону, то амплитуды вторых гармоник достигают максимума за счет периодического обмена энергией внутри береговой зоны, т.е. наблюдается полный период обмена энергией, если $I_r < 7H/L$, то амплитуда второй гармоники не имеет ярко выраженного максимума, слабо меняется во всей береговой зоне, либо растет только у берега.

В **Главе 4** приводится исследование свойств нелинейной трансформации волн в береговой зоне и их влияния на транспорт наносов.

При распространении волн на промежуточной глубине (диапазон относительных глубин - $0.022 < h/L < 0.37$ реализуются трехволновые околорезонансные взаимодействия, где полный резонанс наблюдается либо по волновым числам (k), и тогда по частотам (ω) будет наблюдаться отклонение от резонанса (расстройка, δ) $\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 = \delta_\omega$, либо, наоборот, по

частотам реализуется полный резонанс, а по волновым числам - расстройка $k_1 + k_2 - k_3 = \delta_k$.

Околорезонансные трехволновые взаимодействия приводят к периодическому росту и затуханию высших гармоник за счет энергии основной гармоники на пространственном периоде порядка длины волны.

При наличии расстройки по волновому числу длина пространственного периода обмена энергией между гармониками (L_b) обратно пропорциональна величине отклонения от полного резонанса: $L_b = 2\pi/\delta_k$, где δ_k – расстройка по волновому числу. Если существует расстройка по частоте, период, на котором амплитуда второй гармоники вырастает от минимальных значений до максимума и вновь убывает до минимума, определяется как $\tau = 2\pi/\delta_\omega$, где δ_ω – расстройка по волновому числу.

По какому параметру – по волновому числу или по частоте – происходит расстройка, остается невыясненным.

Вышеописанный процесс приводит к изменению симметрии волн, что, в свою очередь, вызывает возникновение градиентов волновой компоненты поперечного транспорта наносов и переформирование подводного профиля дна под действием волнения. Таким образом, знание особенностей околорезонансных трехволновых взаимодействий необходимо для понимания морфодинамических процессов, протекающих в береговой зоне водоемов.

4.1 Проявления наличия расстройки или полного резонанса по волновым числам и по частотам

Анализ данных натурального эксперимента «Шкорпиловцы-2007» и лабораторного эксперимента «Сочи-2015» позволяет сделать вывод о наличии расстройки по волновым числам, о чем свидетельствует постоянство формы профиля волн во времени и изменение ее в пространстве (рис. 1), а также положение второй гармоники волнового движения в точности на удвоенной частоте пика спектра (рис. 2).

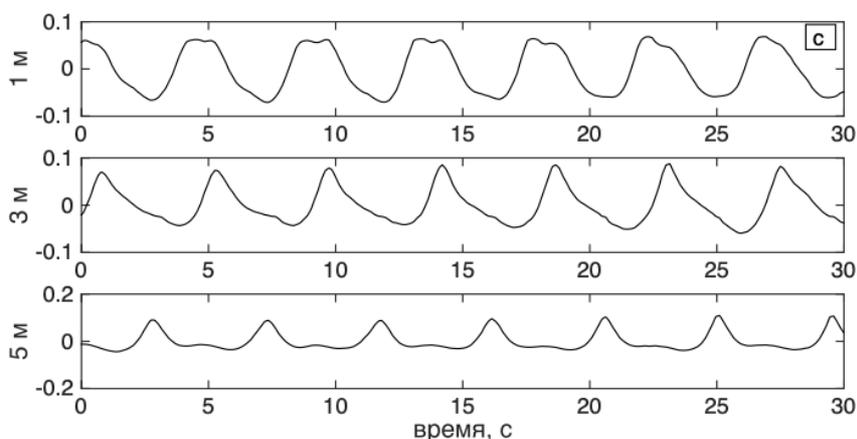


Рисунок 1. Профиль волн, измеренных в ходе лабораторного эксперимента «Сочи-2015»

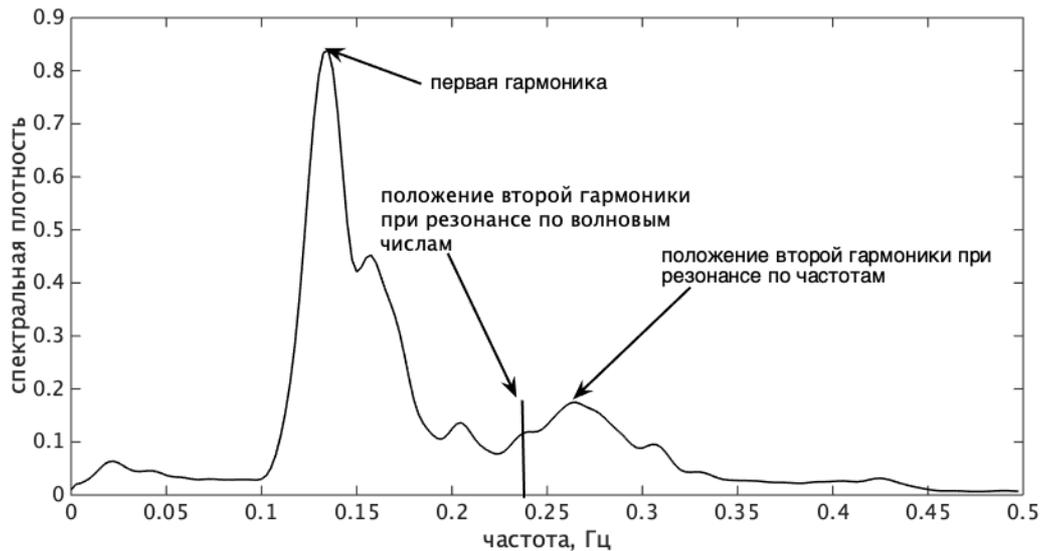


Рисунок 2. Спектр волн, измеренных в ходе натурального эксперимента «Шкорпиловцы-2007», расстояние от берега – 123 м, глубина – 3.8 м, значимая высота волны – 1.7 м, период пика спектра – 7.5 с

4.2 Возможность предсказания пространственной периодичности обмена энергией между гармониками

По данным численного и лабораторного экспериментов были определены длины пространственных периодов обмена энергией между гармониками.

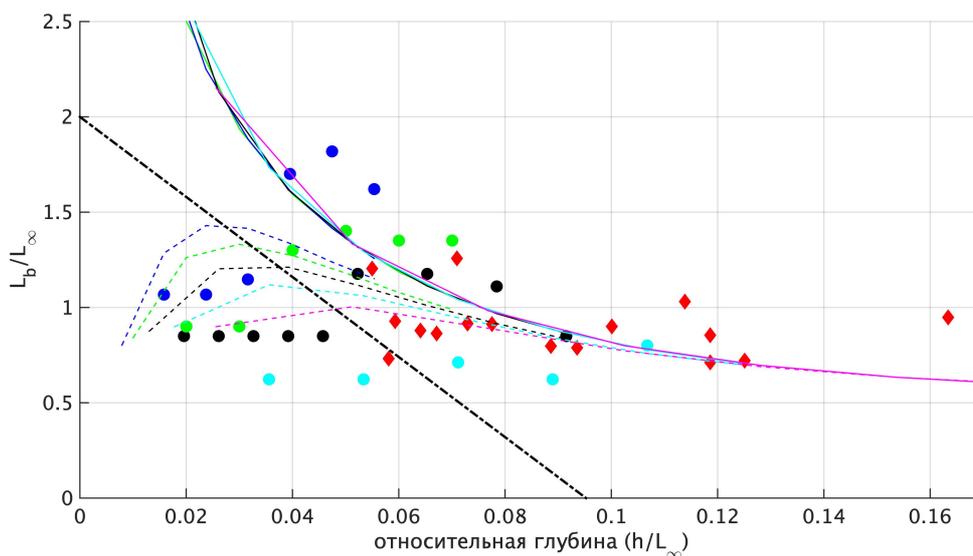


Рисунок 3. Зависимость периода обмена энергией между гармониками от относительной глубины. Сплошная линия – периоды, рассчитанные исходя из дисперсионного соотношения линейной теории, пунктирная линия – периоды, рассчитанные исходя из нелинейного дисперсионного соотношения. Результаты экспериментов: кружки – численного, ромбики – лабораторного.

Показано (рис. 3), что периодичность обмена на мелкой воде слабо зависит от глубины и может быть предсказана по формуле $L_b/L_\infty = L_{bnl} - 0.35L_b$, где L_∞ - длина волны на глубокой воде, L_{bnl} - длина периода обмена энергией, рассчитанная исходя из нелинейного дисперсионного соотношения. На промежуточной глубине период обмена может быть предсказан исходя из дисперсионного соотношения линейной теории. Эти случаи могут быть разделены линией $L_b/L_\infty = 21h/L_\infty + 2$ (черная пунктирная линия на рис. 3) или грубо - по пороговому значению относительной глубины $h/L = 0.05$.

4.3 Сдвиг фаз между первой и второй гармониками

Сдвиг фаз между первой и второй гармониками волнового движения (бифаза) характеризует изменение асимметрии волн, влияющей на направление расхода наносов в береговой зоне. Было проведено исследование, направленное на установление закономерностей изменения сдвига фаз между гармониками в зависимости от стадии трансформации волн.

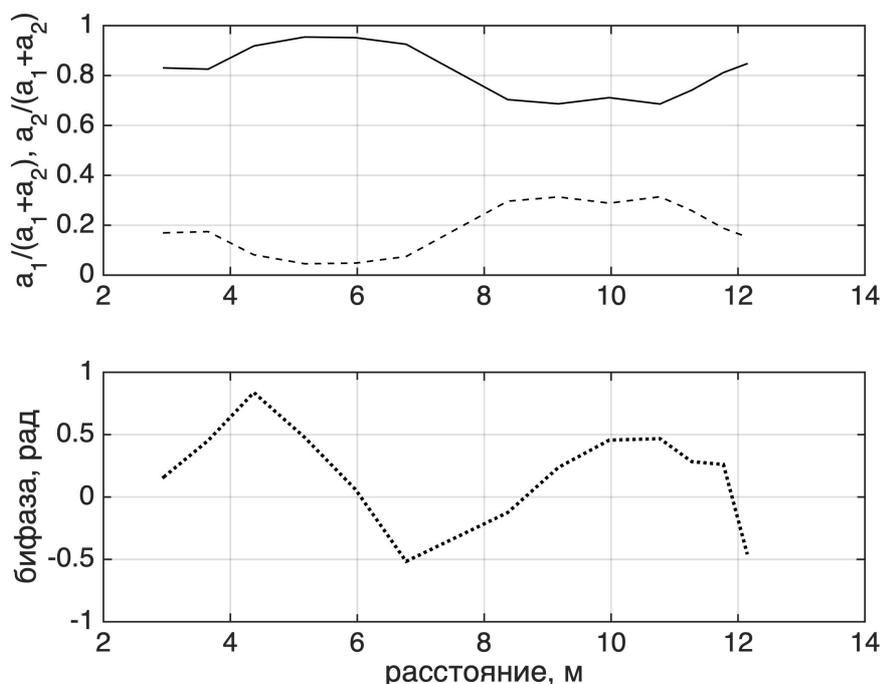


Рисунок 4. Изменения амплитуд первой и второй гармоники (вверху) и бифазы (внизу) для волн, измеренных в ходе эксперимента «Сочи-2013», серия 50 (высота 10 см, период 1.86 с, уклон дна - 0.022)

Проведенный анализ данных лабораторного эксперимента «Сочи-2015» показал, что в нелинейно дисперсионных волнах, распространяющихся над наклонным дном изменение бифазы строго следует изменениям амплитуд первой и второй гармоники и периодичности обмена энергией между ними (рис. 4). При этом бифаза изменяется в интервале от $-\pi/2$ до $\pi/2$. Максимальному значению амплитуды второй гармоники на пространственном периоде обмена энергией между гармониками соответствует нулевое значение

бифазы.

4.4 Параметризация максимальных значений амплитуды второй гармоники

Были отобраны серии измерений лабораторного эксперимента «Сочи-2013», характеризующиеся наличием ярко выраженного периодического обмена энергией между гармониками. Величина относительной амплитуды второй гармоники определялась как $a_2/(a_1 + a_2)$ и выбиралось ее максимальное значение на ближнем к берегу периоде обмена энергией между гармониками.

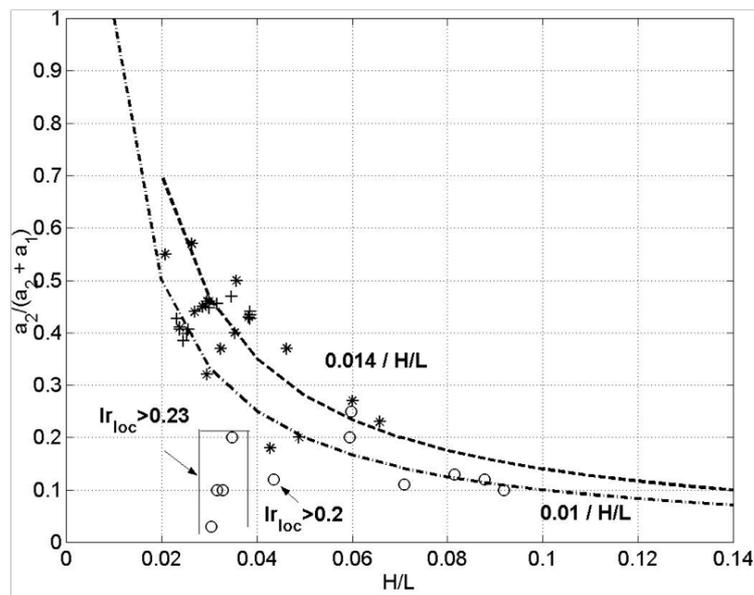


Рисунок 5. Параметризация амплитуды второй гармоники в зависимости от крутизны волн. + - данные натурального эксперимента «Шкорпиловцы-2007», лабораторный эксперимент: * - уклон 0.02, o - уклон 0.043

Наиболее ярко проявляется зависимость максимальной амплитуды второй гармоники от крутизны волны. На рис. 5 видно, что для уклона дна 0.022 амплитуда второй гармоники хорошо аппроксимируется параболой $0.014/(H/L)$ для больших значений амплитуд вторых гармоник и $0.01/(H/L)$ для малых значений. Для уклона дна 0.043 часть данных можно аппроксимировать такой же параболой, а часть данных в области, отделенной пунктирной линией, лежит значительно ниже. Для этих данных число Ирибаррена больше 0.2, а амплитуда второй гармоники в среднем не превышает 10%. Данные натурального эксперимента «Шкорпиловцы-2007» рассмотренного ранее, также удовлетворяют этой зависимости (рис. 5).

4.5 Границы существования трехволновых околорезонансных взаимодействий. Положение максимума второй гармоники

Процесс трансформации волн при распространении с глубокой воды в сторону берега во втором приближении можно представить следующим образом: на входе в береговую зону волны имеют форму, соответствующую

приближению Стокса (сдвиг фаз между гармониками равен 0, амплитуды гармоник малы); затем, при уменьшении глубины, на форму волны начинают оказывать влияние околорезонансные трехволновые взаимодействия, приводящие к периодическому росту и затуханию высших гармоник и изменению сдвига фаз между ними, соответствующему стадии трансформации волн (Глава 4.3); при дальнейшем распространении в сторону берега волны принимают пилообразную форму, сдвиг фаз между гармониками остается отрицательным и близким к $-\pi/2$.

По данным лабораторного эксперимента «Сочи-2013» и натурального эксперимента «Шкорпиловцы-2007» было получено распределение значений бифазы в зависимости от безразмерного параметра

$$K = \frac{h}{L_b \tan \alpha}$$

где h – глубина, $\tan \alpha$ – уклон дна, L_b – пространственный период обмена энергией между гармониками. Параметр K определяет расстояние до берега, выраженное в количестве периодов обмена энергией между гармониками.

Исходя из полученного распределения значений бифазы, береговую зону моря можно разделить на 3 участка (рис. 6): наиболее глубоководный, характеризующийся околонулевыми значениями бифазы, где волны могут быть описаны моделью Стокса ($K > 5$), участок промежуточной глубины, где происходит периодический обмен энергией между гармониками, и бифаза флуктуирует в диапазоне от $-\pi/2$ до $\pi/2$ ($1 < K < 5$), и участок, где волны принимают пилообразную форму, и на котором бифаза стремится к $-\pi/2$ ($K < 1$). Глубину, соответствующую границам выделенных участков береговой зоны, можно определить путем решения трансцендентного уравнения:

$$h_b = K L_b \tan \alpha$$

где h_b – глубина границы, $L_b = 2\pi/(k_2 - 2k_1)$, волновые числа k_1 , k_2 вычисляются исходя из дисперсионного соотношения линейной теории, K – безразмерный параметр, значения которого обсуждались выше.

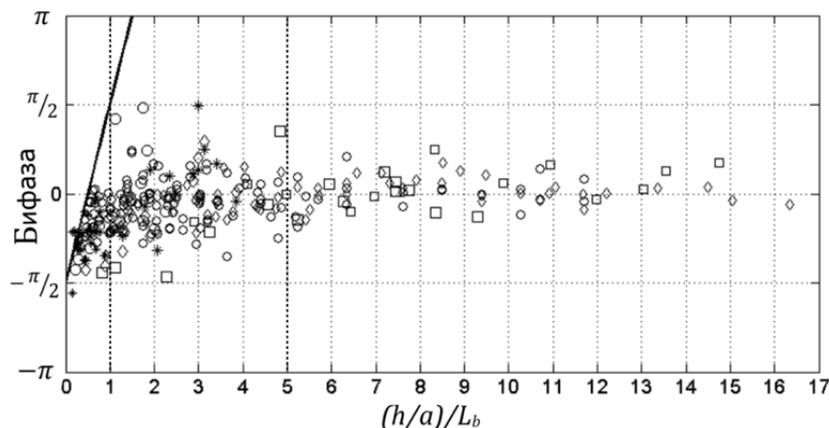


Рисунок 6. Распределение значений бифазы в зависимости от относительного расстояния до берега

В **Главе 5** полученные ранее сведения сведены в методику оценки береговых зон по степени их уязвимости к волновому воздействию.

5.1 Описание методики

Ниже описан алгоритм, позволяющий оценить баланс перемещений наносов под воздействием волн и противотечения и определить, будет ли происходить размыв или намыв берега.

1. Чтобы провести анализ уязвимости определенной береговой зоны к данному режиму волнения, необходимо знать высоту и период волны, уклон дна, крупность и плотность донных осадков.
2. Определить, будет ли реализован в данной береговой зоне периодический по пространству обмен энергией между первой и второй гармониками волн. Для этого применяется критерий на основе числа Иррибаррена: если выполняется соотношение $Ir < 7H/L$, где H – высота волны на входе в береговую зону, L – длина волны на входе в береговую зону, $Ir = \tan \alpha \sqrt{H/L}$ – число Иррибаррена, периодический обмен энергией между волновыми гармониками будет происходить, амплитуды высших гармоник будут достигать значительных величин (> 0.3) и сдвиг фаз между гармониками в точке максимума второй гармоники будет равняться нулю, то есть, в этой точке значения направленной в сторону берега компоненты расхода наносов будут велики и могут компенсировать действие противотечения и препятствовать размыву берега. Если же волновой режим не удовлетворяет данному критерию, амплитуда второй гармоники не достигнет значительных величин, а сдвиг фаз между гармониками принимает отрицательные значения. Таким образом, компонента расхода наносов, вызванная асимметрией волн и направленная в сторону берега, как правило не компенсирует направленную от берега компоненту расхода наносов, вызванную противотечением, и берег будет размываться.
3. Если волновой режим удовлетворяет вышеописанному критерию реализации периодического обмена энергией между гармониками волнового движения, то максимальных значений направленная к берегу компонента расхода наносов достигнет в ближайшей к берегу точке максимума второй гармоники, где сдвиг фаз между первой и второй гармониками равен нулю. Чтобы определить положение ближайшей к берегу точки максимума второй гармоники, воспользуемся уравнением трансцендентным уравнением, описывающим зависимость периода обмена от глубины: глубина в этой точке определяется решением уравнения $h_{a_2} = 3/2L_b \tan \alpha$, где $L_b = \frac{2\pi}{k_2 - 2k_1}$ – длина периода обмена энергией между гармониками (расстояние, на котором амплитуда второй гармоники растет от минимальных до максимальных значений, а затем вновь убывает до минимума), k_n – волновое число n -ной гармоники. Сначала вычисляется длина периода обмена энергией на глубине, которой соответствуют исходные волновые параметры, и на ее основе определяется глубина в точке максимума второй гармоники. Далее

длина периода обмена энергией рассчитывается уже на этой глубине и процесс повторяется, пока значение глубины не станет постоянным.

4. Далее определяется, происходит ли обрушение волн в точке, где достигается максимум второй гармоники, - превышает ли глубина, на которой располагается максимум второй гармоники, глубину обрушения волн согласно критерию обрушения, предложенному Батъесом ($\gamma_b = H/d = 0.8$, где d – глубина в точке максимума второй гармоники, H – высота волны в точке максимума второй гармоники), или нет.

- Если глубина в точке максимума второй гармоники больше глубины начала обрушения волн, определяется амплитуда второй гармоники согласно следующей параметризации:

$$\frac{a_2}{a_1 + a_2} = \frac{0.014}{H/L}$$

$$H = 2\sqrt{a_1^2 + a_2^2}$$

где a_m – амплитуда m -ой гармоники, H – высота значительных волн, $L = \sqrt{ghT}$, L – длина волны, T – период, h – глубина. Затем вычисляется расход наносов по формуле Бейларда с учетом противотечения. Положительные значения соответствуют направленному к берегу расходу наносов в точке максимума второй гармоники. Береговые зоны, где в точке максимума амплитуды второй гармоники транспорт наносов направлен в сторону берега, считаются устойчивыми к волновому воздействию, так как наносы не будут выноситься за пределы первого подводного вала.

- Если глубина в точке максимума второй гармоники меньше глубины, на которой начинается обрушение, рассматривается транспорт наносов в точке обрушения. Возможны два различных сценария:
 - Обрушение волн происходит по типу ныряющего буруна («plunging»). Из предыдущих исследований известно, что в подобной ситуации сдвиг фаз между гармониками в момент обрушения составляет $\pi/2$, то есть направленный к берегу поток наносов в данной точке отсутствует, и морфодинамика берега определяется действием противотечения. Это значит, что берег будет размываться при данном волновом режиме. Обрушение данного типа реализуется при $0.5 < Ir < 3.3$, где число Иррибаррена определяется для волн на глубокой воде.
 - Обрушение происходит по типу скользящего буруна («spilling»), при котором сдвиг фаз между гармониками волнового движения близок к 0. Амплитуда второй гармоники в точке обрушения определяется с помощью параметризации в зависимости от числа Урселла:

$$\frac{a_2}{a_1} \sim \frac{3}{4}Ur$$

$$Ur = \frac{a/h}{(kh)^2}$$

где a_1 , a_2 – амплитуды первой и второй гармоник соответственно, $a = H/2$, H – локальная высота волны, h – глубина, k – локальное волновое число. Определенные таким образом амплитуды первой и второй гармоник в точке обрушения, где они имеют максимальную относительную величину, подставляются в формулы для расчета наносов по формуле Бейларда, и так же, как и раньше, определяется направление транспорта наносов и определяется уязвим ли берег.

На основе приведенной выше методики для инженерных целей разработана диаграмма, с помощью которой можно легко понять, будут ли эффекты нелинейной трансформации волнения проявляться наиболее ярко в данной береговой зоне при определенном режиме волнения, или они будут слабы и их влиянием можно пренебречь. Диаграмма представлена на рис. 7. Чтобы воспользоваться ею, необходимо знать период и высоту волн режима, для которого проводится оценка, и уклон дна в рассматриваемой береговой зоне.

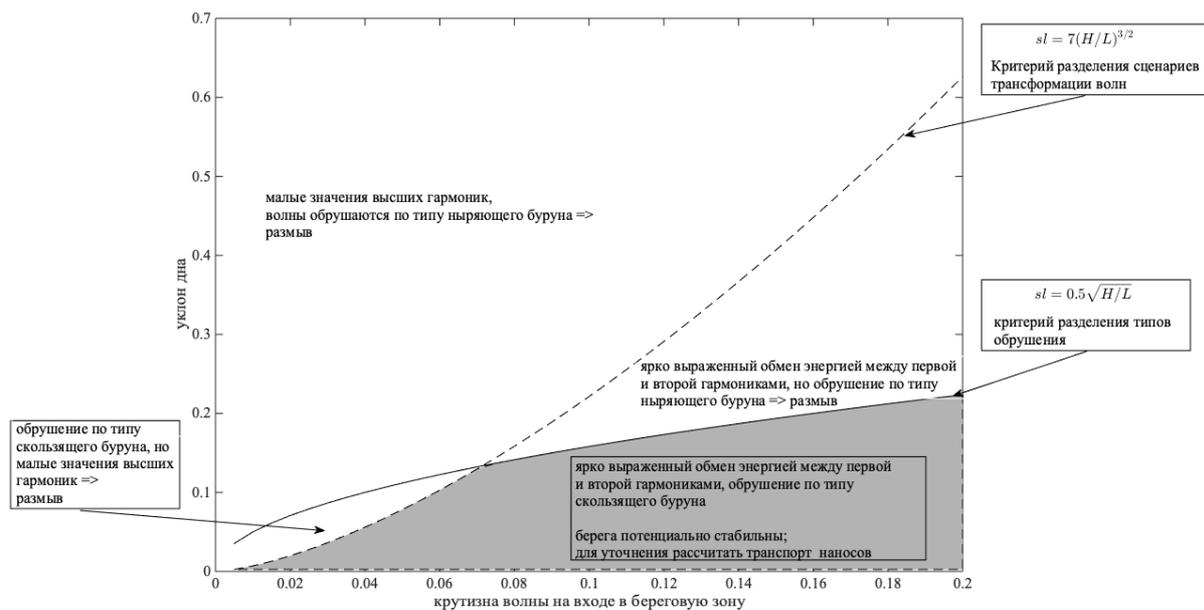


Рисунок 7. Диаграмма уязвимости береговых зон к волновому воздействию

Пунктирной линией разделены сценарий трансформации волн с ярко выраженным периодическим обменом энергией между первой и второй гармониками и сценарий, при котором амплитуда второй гармоники меняется незначительно. Сплошной линией разделены волновые режимы, при которых происходит обрушение волн по типу скользящего и опрокидывающегося буруна. Для того, чтобы не происходил размыв берега, необходимо выполнение трех условий:

1. должен реализовываться сценарий трансформации волнения, при котором происходит ярко выраженный периодический обмен энергией

между гармониками;

2. обрушение должно происходить по типу скользящего буруна;
3. при реализации первых двух условий поперечный поток наносов в точке максимума второй гармоники или в точке обрушения, если оно происходит дальше от берега, должен быть направлен в сторону берега.

Область, где выполнены первые два условия, показана на диаграмме серым цветом.

5.2 Применение методики для оценки уязвимости береговых зон черноморского побережья Болгарии

В качестве исходных были взяты данные об уклонах дна и гранулометрическом составе донных отложений для 17 районов черноморского побережья Болгарии, выделенных в работе С. Керемедчиева и Е. Трифионовой 2003 года. Данные об экстремальных, средних и наиболее вероятных волновых режимах были получены в результате численного моделирования, выполненного Н. Валчевым (Институт Океанологии БАН, г. Варна). В каждом из выделенных районов встречается несколько профилей дна с различным средним уклоном (от 0.0114 до 0.0251).

Рассмотренные режимы волнения на различных типах профилей подводного склона приводят к реализации четырех различных вариантов трансформации волнения и соответствующим морфодинамическим последствиям.

1. Реализуется периодический обмен энергией между гармониками в береговой зоне, максимальное значение амплитуды второй гармоники располагается мористее зоны обрушения; транспорт наносов в точке максимума второй гармоники направлен в сторону берега; береговая зона устойчива к волновому воздействию
2. Периодический обмен энергией между гармониками реализуется в береговой зоне; максимальное значение амплитуды второй гармоники располагается внутри зоны обрушения волн; обрушение происходит по типу скользящего буруна, транспорт наносов в точке начала обрушения волн направлен в сторону берега; береговая зона устойчива к волновому воздействию
3. Реализуется периодический обмен энергией между гармониками в береговой зоне, максимальное значение амплитуды второй гармоники располагается внутри зоны обрушения; транспорт наносов в точке максимума второй гармоники направлен в сторону моря; береговая зона уязвима к волновому воздействию
4. Периодический обмен энергией между гармониками в береговой зоне не реализуется; действие противотечения преобладает над волновой компонентой транспорта наносов во всей береговой зоне; береговая зона уязвима к волновому воздействию

Реализация того или иного варианта показана на карте (рис. 8). Для некоторых районов реализуется несколько вариантов в зависимости от диапазона значений уклона дна.

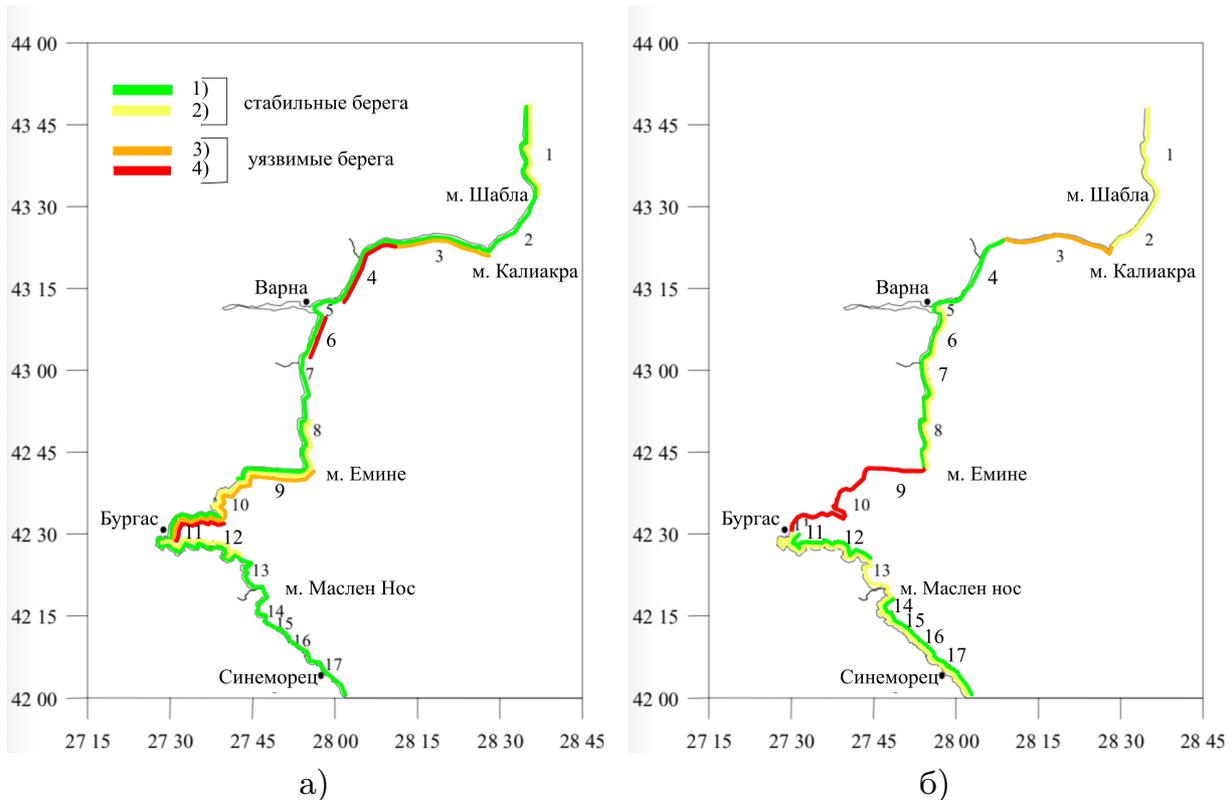


Рисунок 8. Районирование болгарского побережья Черного моря в зависимости от морфодинамических проявлений эффектов нелинейной трансформации волн. а) – для средних волновых режимов, б) – для экстремальных

В **Заключении** приводятся основные результаты работы:

1. Береговые зоны могут быть классифицированы по степени ожидаемых проявлений нелинейности волнения, заключающихся в периодическом обмене энергией между первой и второй нелинейными гармониками, в зависимости от среднего уклона и числа Ирибаррена. По экспериментальным и модельным данным показано, что если $I_r > 7H/L$, где H/L – крутизна волн на входе в береговую зону, амплитуды вторых гармоник достигнут максимума за счет периодического обмена энергией внутри нее, т.е. наблюдается полный период обмена энергией между гармониками. Если $I_r < 7H/L$, то нет ярко выраженного периодического обмена между гармониками, амплитуды вторых гармоник увеличиваются только у берега или остаются малыми во всей береговой зоне.
2. При реализации сценариев трансформации волн, характеризующихся наличием периодического обмена энергией между гармониками, длина участка, на котором вторая гармоника вырастает до максимальных

значений, а затем вновь убывает до минимальных, параметризована в зависимости от величины расстройки по волновому числу, определенному по линейному дисперсионному соотношению для волн, распространяющихся на относительной глубине $h/L > 0.05$, и по нелинейному дисперсионному соотношению для волн, распространяющихся на меньшей относительной глубине.

3. В нелинейно дисперсионных волнах, распространяющихся над наклонным дном, изменение сдвига фаз между первой и второй гармониками (бифазы) строго следует изменениям амплитуд этих гармоник и периодичности обмена энергией между ними. При росте амплитуды второй гармоники от минимальных до максимальных значений бифаза изменяется от $-\pi/2$ до 0 , при обратной передаче энергии от второй гармоники к первой происходит изменение бифазы от 0 до $\pi/2$. Таким образом, бифаза изменяется в интервале от $-\pi/2$ до $\pi/2$.
4. Значение бифазы может быть маркером границ существования трехволновых околорезонансных взаимодействий: область их наиболее яркого проявления характеризуется изменением бифазы в диапазоне значений от $-\pi/2$ до $\pi/2$. В береговой зоне может наблюдаться несколько периодов обмена энергией между гармониками. Положение ближайшего к берегу максимума второй гармоники может быть определено как $3/2$ длины периода обмена энергией между гармониками.
5. Максимальные значения амплитуды второй гармоники параметризованы в зависимости от крутизны волн. По данным натурального эксперимента показано, что значение амплитуды второй гармоники не может превышать 0.7 от суммы амплитуд гармоник.
6. Так как максимальные значения амплитуды второй гармоники соответствуют нулевым значениям сдвига фаз между первой и второй гармониками, максимальные значения компоненты транспорта наносов, вызванной асимметрией волн, достигаются в точке максимума второй гармоники, согласно структуре формулы Бейларда.
7. В качестве индикатора стабильности или уязвимости береговых зон к волновому воздействию предложено использовать наличие или отсутствие в береговой зоне точки, где суммарный транспорт наносов направлен в сторону берега.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Сапрыкина Я. В. Сценарии нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря / Сапрыкина Я. В., Кузнецов С. Ю., Андреева Н. К., Штремель М. Н. // *Океанология*. – 2013. – Т. 53. – № 4. – С. 476–485.
2. Сапрыкина Я. В. О возможности параметризации бифазы при трансформации волн в береговой зоне моря / Сапрыкина Я. В., Штремель М. Н., Кузнецов С. Ю. // *Океанология*. – 2017. – Т. 57. – № 2. – С. 284–296.

Публикации Scopus, Web of Science:

3. Kuznetsova O. Dynamics of sandy beach in dependence on wave parameters / Kuznetsova O., Saprykina Ya., Shtremel M., Kuznetsov S., Korzinin D., Trifonova E., Andreeva N., Valchev N., Prodanov B., Eftimova P., Lambev T., Dimitrov L. // *Proceedings of IMAM 2017 Conference: Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources* – 2017. – V.2. – P.1075–1079.
4. Saprykina Ya. Influence of nonlinear waves transformation above submerged structures on the sediment transport in the coastal zone / Saprykina Ya., Korzinin D., Shtremel M. // *Proceedings of OCEANS 2017, MTS/IEEE, Aberdeen*. – 2017. – P.1–7.
5. Korzinin D. Long-term variability of coastal profile in different geomorphological conditions (the case of Black Sea sandy coasts) / Korzinin D., Shtremel M., Tatui F., Vespremeanu-Stroe A. // *Proceedings of international conference «Oceans'17 MTS/IEEE Aberdeen»*. – 2017. – P.1–5.
6. Saprykina Ya. Parameterization of evolution of biphasic during nonlinear transformation of waves in coastal zone / Saprykina Ya., Kuznetsov S., Shtremel M. // *Proceedings of 35th Conference on Coastal Engineering (ICCE 2016), Antalya, Turkey*. – 2016. – P.1–13.
7. Kuznetsov S. Spectral structure of breaking waves / Kuznetsov S., Saprykina Y., Divinskii B., Shtremel M. // В сборнике: *Towards Green Marine Technology and Transport – Proceedings of the 16th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, IMAM 2015*. – 2015. – P. 853–858.

Прочие публикации:

8. Сапрыкина Я. Влияние периодических нелинейных процессов при трансформации волнения на транспорт наносов в береговой зоне / Сапрыкина Я., Кузнецов С., Штремель М. // В сборнике: *Морские берега – эволюция, экология, экономика* Материалы XXIV Международной береговой конференции, посвященной 60-летию со дня основания Рабочей

- группы «Морские берега»: в 2 томах. Рабочая группа «Морские берега», Российский государственный гидрометеорологический университет. – 2012. – С. 303–306.
9. Сапрыкина Я. В. Нелинейные эффекты трансформации нерегулярных волн в береговой зоне моря / Сапрыкина Я. В., Кузнецов С. Ю., Штремель М. Н., Андреева Н. К. // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ: Труды 3-й Международной конференции «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водных объектов», Иркутск, 29 июля – 3 августа, 2013 г. Отв. ред. Е. А. Козырева, А. Ш. Хабидов. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. – 2013. – С. 266–268.
 10. Shtremel M. Typical scenarios of nonlinear wave transformation: criteria of realization and contribution in relief changes / Shtremel M., Saprykina Ya., Kuznetsov S., Andreeva N. // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2014. – V.16.
 11. Штремель М. Оценка характеристик нелинейной трансформации волнения в береговой зоне по данным натурального и лабораторного эксперимента / Штремель М. // Береговая зона – взгляд в будущее: Материалы XXV международной береговой конференции. – 2014. – Т.1. – С. 188–191.
 12. Kuznetsov S. Spectral structure of breaking waves and its influence on the transport of sediments in coastal zone / Kuznetsov S., Saprykina Y., Shtremel M., Kuznetsova O. // MTS/IEEE OCEANS 2015 – Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World. – 2015. – P.1–6.
 13. Штремель М. Границы существования трехволновых нелинейных околорезонансных взаимодействий / Штремель М., Сапрыкина Я., Кузнецов С. // Тезисы докладов научно-практической конференции «Пути сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова». – 2015. – С.110–111.
 14. Shtremel M. Method of wave-driven cross-shore sediment transport prediction / Shtremel M., Saprykina Ya., Kuznetsov S. // Book of abstracts of International Geographical Union Regional Conference. – 2015. – P.1341.
 15. Сапрыкина Я. Метод оценки уязвимости береговой зоны под воздействием волнения на примере южного побережья полуострова Индостан / Сапрыкина Я., Кузнецов С., Штремель М., Сундар В. // Процессы в геосредах. – 2015. – № 3. – С. 76–87.
 16. Shtremel M. On ways of prediction of coastal zone wave transformation periodicity / Shtremel M., Saprykina Ya., Kuznetsov S. // Towards Green Marine Technology and Transport. – 2015. – P.911–914.

17. Shtremel M. New approach to coastal zone vulnerability classification / Shtremel M. // EMECS 11-Sea Coasts XXVI. Joint conference. Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. – 2016. – P.34.
18. Штремель М. Особенности околорезонансных трехволновых взаимодействий в волнах на промежуточной глубине / Штремель М. // Океанологические исследования. – 2019. – Т.47., № 1 – С.138–144.