

На правах рукописи

**Крыленко Марина Владимировна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ  
КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ПЕСЧАНЫХ НАНОСОВ В  
БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ**

Специальность: 25.00.28 – Океанология

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

**Геленджик – 2007**

Работа выполнена в Южном отделении Института океанологии  
им. П.П. Ширшова Российской Академии наук (г. Геленджик)

**Научные руководители:**

Доктор географических наук, профессор Рубен Дереникович Косьян  
Доктор физико-математических наук, Сергей Юрьевич Кузнецов

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор Владимир Кириллович Дебольский  
Кандидат географических наук, доцент Виктор Семенович Архипкин

**Ведущая организация:**

Государственный океанографический институт (г. Москва)

Защита состоится 22 мая 2007 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета К 002.239.01 при Институте океанологии  
им. П.П. Ширшова РАН по адресу: 117997, Москва, Нахимовский пр., 36

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института океанологии  
им. П.П. Ширшова РАН

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » апреля 2007 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат географических наук

Панфилова С. Г.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Исторически сложилось, что на побережьях морей и океанов концентрировались населенные пункты, промышленные и транспортные объекты. В условиях возрастания антропогенной нагрузки на прибрежные территории реализация концепции устойчивого развития возможна только с учетом всех факторов и процессов, определяющих состояние берегов (Kos'yan, Magoon, 1993; Yesin, Ivanov, Kos'yan, 1996; Kos'yan et al., 2000, 2005; Крыленко, 2001; Айбулатов, 2005).

Морфолитодинамика берегов и прибрежного рельефа дна во многом определяется характером перемещения наносов в береговой зоне под воздействием волн и течений. Строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений, создание проектов защиты берегов, обеспечение экологической безопасности и рекреационного режима пляжей невозможно без учета процесса перемещения наносов в береговой зоне (Kuklev et al., 1993; Kos'yan et al., 2005).

Значительная часть песчаных наносов во время шторма переносится во взвешенном состоянии, поэтому понимание закономерностей их взвешивания и особенностей пространственного распределения необходимо для достоверных расчетов вдольберегового и поперечного потока наносов. Одной из приоритетных современных проблем исследования береговой зоны является описание пространственно-временной изменчивости поля концентрации взвешенных наносов.

**Целью** работы является развитие представлений о механизмах формирования и пространственно-временной изменчивости поля концентрации взвешенных осадков нерегулярными волнами в береговой зоне на основе натурных данных.

Для достижения поставленной цели в процессе работы посредством анализа полученных экспериментальных данных решались следующие **задачи**:

- Описание изменчивости вертикального распределения концентрации взвеси на частотах индивидуальных волн и их групп.
- Оценка условий возникновения турбулентности, пространственно-временных характеристик турбулентных областей и влияния турбулентности на концентрацию взвешенных наносов.

- Создание модели флуктуаций концентрации взвешенных наносов и проверка достоверности модели на основе экспериментальных данных.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Показано, что высокочастотная изменчивость вертикального распределения концентрации взвешенных песчаных наносов в береговой зоне определяется параметрами индивидуальных волн, а частота возникновения пиков концентрации - низкочастотными характеристиками волнения.
- На основе экспериментальных данных подтверждено, что величина кинетической энергии турбулентных вихревых структур является наиболее существенным фактором, влияющим на формирование поля концентрации взвешенных наносов в зоне разрушения волн.
- Представлена модель флуктуаций концентрации взвешенных песчаных наносов под деформированными волнами, учитывающая конвективные механизмы распространения взвеси, параметры индивидуальных волн и групповую структуру волнения.

#### **Научная новизна работы.**

Впервые на основе натурных данных описаны особенности изменчивости поля концентрации взвеси с дискретностью меньшей, чем период волны. Определены характеристики турбулентности, генерируемой в береговой зоне волновыми движениями, получены оценки роли турбулентности во взвешивании наносов при разных режимах волнения. Подтверждена гипотеза о значительной роли низкочастотных колебаний турбулентной энергии в формировании поля взвеси. Показано наличие локального конвективного механизма взвешивания наносов над рифельным дном.

Все полученные в работе результаты обладают научной новизной и соответствуют современному мировому уровню знаний по данной проблеме.

#### **Фактический материал.**

Работа основана на оригинальных экспериментальных данных, полученных специалистами Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и его Южного отделения во время натурных экспериментов, проведенных на берегах Черного, Северного и Средиземного морей в период с 1994 по 2003 годы, а также результатах лабораторного эксперимента, сделанного сотрудниками Университета Восточной Англии в 1999 г.

**Личный вклад автора** существенен на всех этапах проведенных исследований. Значительная часть натуральных экспериментальных результатов получена при непосредственном участии автора. Обработка экспериментальных данных, расчеты, интерпретация полученных результатов была выполнена непосредственно автором либо в соавторстве с сотрудниками ЮО ИО РАН и ИО РАН.

### **Практическая значимость работы**

Результаты исследования могут оказаться полезными при работах, связанных с защитой от заносимости портов и каналов, строительством гидротехнических сооружений, для определения оптимальных трасс морских подходных каналов, прокладки трубопроводов и кабельных линий. Сюда же следует добавить рекреационные и санитарные аспекты использования прибрежной зоны. Переносимые водными потоками твердые частицы могут являться абсорбентами химического или радиационного загрязнения, поэтому данные, приводимые в работе, важны для решения экологических задач. Полученные выводы позволят улучшить существующие модели для прогнозирования изменений подводного рельефа и очертаний береговой линии.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Конференции грантодержателей регионального конкурса «Юг России» (Туапсе, 2006 г.), II-ой Международной конференции «Понт Эвксинский» (Севастополь, 2001 г.), Отчетной Конференции по программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН (Азов, 2005 г.), XXV и XXX-ой Международных конференциях «Coastal Engineering» (США, 1996, 2006 гг.), VII-ой Международной конференции «MEDCOAST» (Турция, 2005 г.), на семинаре III-ей Международной Программы «MEDCOAST» (Болгария, 1997 г.), а также на расширенных коллоквиумах лаборатории литодинамики Южного отделения Института Океанологии РАН.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ.

### **Структура и объем работы**

**Диссертация состоит** из введения, пяти глав и заключения. В конце каждой главы приведены выводы. Работа изложена на 126 страницах, включая 82 рисунка, 1 таблицу, список литературы содержит 129 названий.

### **Благодарности**

Автор считает своим долгом выразить искреннюю признательность своим научным руководителям д.г.н. Р.Д. Косьяну и д.ф.-м.н. С.Ю. Кузнецову, чья научная и организационная поддержка в значительной мере способствовала созданию данной работы. Автор благодарит сотрудников Лаборатории литодинамики береговой зоны моря ЮО ИО им. П.П.Ширшова РАН и Лаборатории шельфа и морских берегов ИО им. П.П.Ширшова РАН, а также профессора Университета Восточной Англии К. Винсента за разностороннюю помощь в работе.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследований, определяются цели и ставятся задачи исследований. Представлены основные результаты и сведения об их апробации.

В **Главе 1** дан краткий аналитический обзор современных научных представлений о гидролитодинамических процессах береговой зоны моря. Рассмотрены некоторые особенности гидродинамики береговой зоны, важные для понимания процессов взвешивания песка и распространения взвеси. Установлено, что процесс продуцирования турбулентной кинетической энергии, генерируемой деформированными и обрушающимися волнами и ее влияние на взвешивание наносов, находится в центре внимания современных исследований. Представлены основные сведения о закономерностях формирования поля концентрации взвешенных песчаных наносов в береговой зоне.

Наиболее интенсивно натурные исследования гидролитодинамических процессов береговой зоны начались в 70-х годах XX века. На основе многочисленных натуральных экспериментов, описание которых дано в работах С.М. Анцыферова, Р.Д. Косьяна, Н.В. Пыхова (Анцыферов и Косьян, 1986; Анцыферов и др., 1977, 1978; Косьян и др., 1980; Пыхов и др., 1980) были выявлены основные особенности распределения осредненных значений концентрации взвешенных частиц. Изучением колебаний поля концентрации взвеси на частотах инфрагравитационных волн в натуральных условиях начали заниматься только с 80-х годов прошлого века. Первые же исследования доказали существование его низкочастотных модуляций (Downing, 1984; Sternberg et al, 1984). Последующие эксперименты Д. Хэйнса и Д. Хантли (Hanes, Hutmley, 1986;

Hanes et al., 1988) позволили выявить некоторые характерные черты изменчивости концентрации взвеси. Было выяснено, что интенсивность и высота взвешивания осадка резко увеличивается при прохождении групп волн с периодом 2-3 мин., и значение концентрации в эти периоды определяет средние значения за 15-20 мин (Hanes, Hutley, 1986).

В дальнейшем, полученные Д. Хэйном с соавторами (Hanes et al., 1988), Р.Д. Косьяном, Н.В. Пыховым (1991) экспериментальные данные показали, что в зоне разрушения интенсивное взвешивание осадков проявляется в виде резких пиков концентрации длительностью 20-60 с. Взвешивание песчаных наносов на временных масштабах поверхностных волн происходит один или два раза за период волны, и флуктуационная составляющая играет важную роль в формировании результирующего потока взвешенных наносов (Kos'yan et al., 1996; Kos'yan et al, 1997; Vincent et al., 1999; Black and Vincent, 2001).

В связи со сложностью проведения измерений в условиях реального моря, количественная оценка и прогноз распределения взвешенных наносов в береговой зоне производятся преимущественно путем математического моделирования с использованием параметров, полученных в лабораторных условиях. Тем не менее, строгих и полностью физически обоснованных методов расчета концентрации взвешенных наносов и расхода осадочного материала не существует до сих пор. Достаточно полный обзор подобных моделей сделан в работе С.М. Анцыферова и Т.М. Акивис (2002).

Для расчета расхода наносов по нормали к берегу широко используется энергетическая концепция. Она была разработана Р. Бэгнольдом (Bagnold, 1946) для оценки расхода наносов в поступательных потоках и затем адаптирована для волновых потоков (Bowen, 1980). Наиболее часто используется квазистационарное приближение энергетического подхода в варианте Дж. Бэйларда (Bailard, 1981): результирующий поток взвешенных наносов по нормали к берегу представляют в виде суммы вклада различных частотных диапазонов спектра волн. Анализ натуральных экспериментов и модельных оценок, опубликованных в последнее время, показывает, что не имеется однозначного мнения о пригодности энергетического подхода для прогноза транспорта взвешенных наносов в условиях нерегулярных волн (Foot et al., 1995; Soulsby, 1995; Russell et al., 1996).

Подход, основанный на использовании средних по времени значений концентрации и скорости воды, не учитывает вклад осцилляционных движений

воды, и результирующие расчеты могут на порядки отличаться от реальных концентраций. Необходимость его учета продемонстрирована результатами натуральных (Murray, Davies, Soulsby, 1991; Kos'yan et al., 1996; Kuznetsov, Pykhov, 1998; Vincent, Green, 1990; Black, Vincent, 2001) и лабораторных экспериментов (Villaret, Perrier, 1992; Van Rijn et al, 1993).

В большинстве применяемых моделей пространственно-временные изменения концентрации взвешенных осадков определяются только турбулентной диффузией, и не учитывается конвективный механизм взвешивания, который, как показано в работе (Kos'yan et al, 2000) оказывает существенное влияние на пространственное распределение наносов в потоке.

Анализ современного состояния изученности процессов литодинамики береговой зоны показал, что:

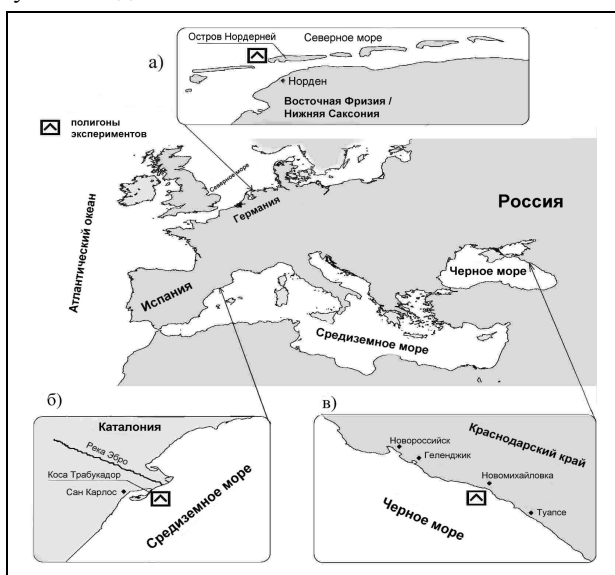
- прогресс в изучении динамики наносов в береговой зоне во многом определяют успешные натурные исследования, осуществленные в штормовых условиях;
- недостаточно исследована пространственно-временная изменчивость концентрации взвешенных осадков;
- практически отсутствуют данные о характере временной изменчивости вертикального профиля концентрации взвешенных наносов на масштабах поверхностных волн;
- имеется мало сведений о причинах временной изменчивости поля взвеси и роли турбулентной энергии в процессе его формирования.
- физически обоснованное моделирование переноса осадков и поля концентрации возможно только с учетом механизмов конвективного взвешивания, фазовых и амплитудных соотношений между концентрацией взвешенных осадков, турбулентной кинетической энергией и потерями волновой энергии в процессе разрушения волны, локального конвективного взвешивания, диффузии и адвекции.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальных полигонов, условий проведения и программ экспериментов, использованных приборов, методики обработки полученных натуральных данных.

Измерение мгновенной концентрации взвешенных наносов проводилось при помощи оптических турбидиметров, разработанных сотрудниками лаборатории литодинамики ЮО ИО РАН (Косьян и др., 1998). Для измерения мгновенных значений скорости воды использовались электромагнитные

двухкомпонентные датчики скорости течения, трехмерные акустические измерители течений. Для измерения возвышений свободной поверхности воды использовались датчики давления, электроконтактные волнографы, акустические измерители течений.

В параграфах 2.2 и 2.3 приведено подробное описание четырех натуральных экспериментов «Нордерней-94», «ЭброДельта-96», «Новомихайловка-02», «Новомихайловка-03» (Рис. 1), проведенных специалистами Института Океанологии им. П.П.Ширшова РАН и его Южного отделения при участии автора настоящей работы, лабораторного эксперимента «Sistex-99» и методов обработки полученных данных.



**Рисунок 1 - Схема расположения исследовательских полигонов: «Нордерней» (а), «ЭброДельта» (б), «Новомихайловка» (в)**

Программы экспериментальных работ включали измерение мгновенных концентраций взвешенных наносов в ряде точек по вертикали и горизонтали, состава и гидравлической крупности наносов, возвышений свободной поверхности воды, составляющих вектора скорости водного потока, параметров донных микроформ. Измерения проводились на участках песчаных пляжей в зонах деформации и разрушения волн на глубинах 0.4-3.5 м. Получено около 100 записей уникальных измерений длительностью от 20 до 60 минут каждая.

В параграфе 2.4 обосновывается методика выделения турбулентной составляющей скорости воды. Резкое уменьшение значений функции когерентности между колебаниями уровня свободной поверхности и скоростью воды, и изменение угла наклона спектров составляющих скорости воды на частоте 0.8 Гц позволяют считать, что при частотах выше 0.8 Гц доминирующее положение занимают турбулентные флуктуации (Косьян и др., 1999). С использованием полосовой численной фильтрации по методу быстрого преобразования Фурье, были получены хронограммы турбулентных компонентов составляющих вектора скорости.

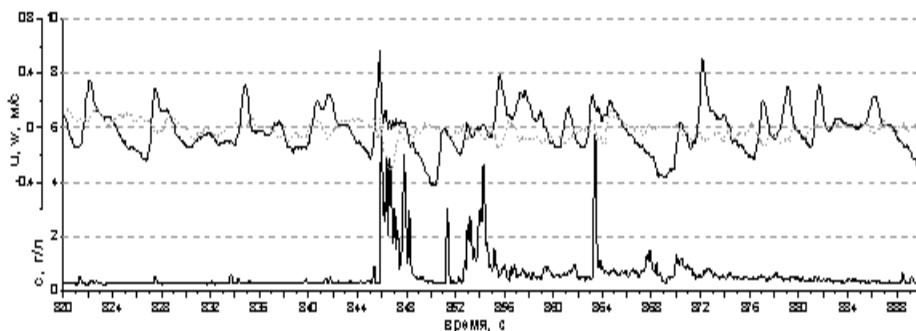
Таким образом, использование современных методов и приборов позволило провести достоверные высокочастотные синхронные измерения концентрации взвешенных наносов и гидродинамических параметров в природных условиях и получить уникальную базу данных. Результаты лабораторного эксперимента "Sistex-99", имевшего аналогичную научную программу, дали возможность сравнить и проанализировать особенности формирования полей концентрации взвеси в природных и лабораторных условиях. Количество и качество исходных данных вполне достаточно для исследования механизмов и закономерностей взвешивания песчаных наносов.

В **третьей главе** рассмотрены особенности пространственно-временной изменчивости концентрации взвеси в береговой зоне.

Анализ записей пульсаций концентрации взвеси в зоне деформированных волн показал, что взвешивание осадков происходит в виде серий пиков концентрации длительностью 1-5 секунд. С увеличением расстояния от дна частота появления пиков концентрации и их величина снижаются. В большинстве случаев, возникновение пиков концентрации взвеси приурочено к моменту смены знака скорости потока. Иногда взвешивание происходит дважды за период волны. Эти наблюдения хорошо согласуются с полученными ранее данными (Пыхов и др., 2003). Спектры концентрации взвешенных наносов под деформированными волнами характеризуются широким максимумом в диапазоне 0.008-0.05 Гц, локальным пиком на частоте максимума спектра волнения и плавно понижаются с увеличением частоты. По мере удаления датчиков концентрации от дна, локальный максимум на частоте подходящих волн становится менее выраженным, спектр – более гладким.

Под разрушающимися волнами спектральная плотность концентрации взвеси монотонно увеличивается с уменьшением частоты и имеет широкий

максимум на частоте 0.02-0.05 Гц. Визуальный анализ временной изменчивости концентрации взвешенных наносов в условиях обрушающихся волн показал, что на хронограммах наблюдаются пики концентрации продолжительностью от 5 до 15 с. Значения концентрации взвеси в момент интенсификации взвешивания осадков превышают ее средние значения в 5-10 раз (Рис. 2). Возникновение пиков концентрации не приурочено к определенной фазе волны и не периодически во времени.

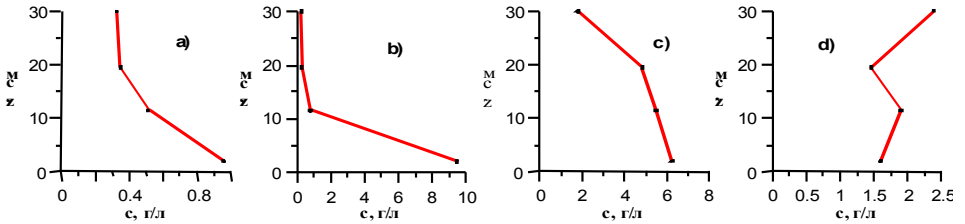


**Рисунок 2 – Фрагмент синхронной записи концентрации взвешенных наносов (с), вертикальной (w) и нормальной к берегу (u) составляющих скорости воды на горизонте 10 см от дна в зоне разрушения волн**

Форма вертикального профиля концентрации взвешенных наносов очень быстро изменяется во времени и может значительно отличаться от среднего за запись профиля концентрации взвеси. Анализируя высокочастотную изменчивость вертикального профиля концентрации взвешенных наносов, мы выделили несколько характерных типов вертикального распределения концентрации (Рис. 3) (Kos'yan, Krylenko, 2006).

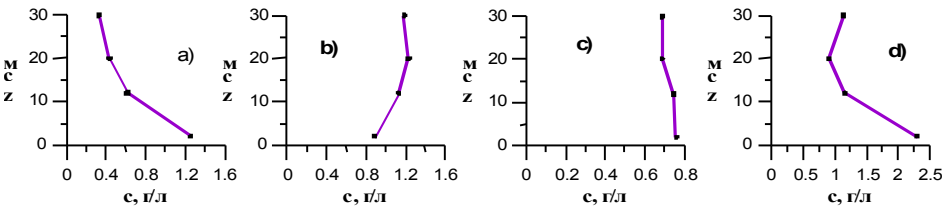
Вертикальный профиль, близкий к логарифмической кривой (Рис. 3а) и слабо изменяющийся в течение периода волны, как правило, наблюдается, когда критерий Шильдса под гребнями волн не превышает критического значения. Во втором случае (Рис. 3б) высокие значения концентрации взвеси резко убывают по направлению к поверхности, градиент концентрации составляет до 1 г/л на см подъема. Третий тип (Рис. 3с) вертикального распределения, приближающийся к линейному виду, наблюдается при прохождении крупных волн или при обрушении волны. Взвешенный песок может подниматься на высоту нескольких десятков сантиметров от дна. Максимальные вертикальные градиенты концентрации смещаются в слой 20-30 см от дна. На рисунке 3д показан

четвертый вид вертикального распределения взвеси, имеющий форму ломаной линии. Характерно чередование слоев с высокими и низкими значениями концентрации взвешенных наносов. Значительную роль в формировании такого вертикального распределения наносов играют адвективные процессы.



**Рисунок 3 - Характерные типы вертикального распределения концентрации взвеси,  $c$  - концентрация,  $z$  - расстояние от дна**

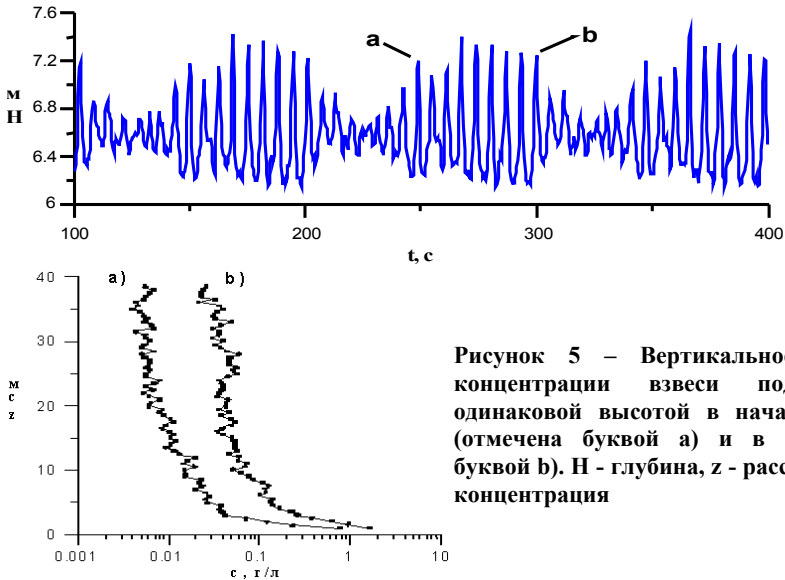
Во время развития и затухания пика концентрации взвеси вертикальный профиль концентрации изменяется от вогнутого в начале прохождения пика, до выпуклого в моменты наибольшей концентрации в пике (Рис. 4). Выпуклая форма вертикального профиля концентрации взвеси и возникновение пиков на разных горизонтах без видимой задержки по времени свидетельствуют о конвективном характере процессов взвешивания. Это подтверждает гипотезу Нильсена (Nielsen, 1979) о взвешивании и распределении песка в толще воды за счет захвата и переноса материала формирующимися под проходящими волнами вихрями.



**Рисунок 4 - Изменения вертикального профиля концентрации взвеси ( $c$ ) во время развития и разрушения пика концентрации (a - начало пика, b, c - середина, d - окончание),  $z$  - расстояние от дна**

Анализ данных показал, что групповая структура волнения оказывает значительное воздействие на взвешивание наносов под отдельными волнами внутри группы. Осредненные за период волны значения концентрации взвеси под индивидуальной волной в конце группы больших волн в несколько раз больше, чем под такой же по высоте волной в начале группы (Рис. 5). Интенсификация процесса взвешивания наносов под группами больших волн происходит только

после прохождения максимальных волн в группе и плавно затухает по достижению ложбины геометрической огибающей группы. Мгновенные значения концентрации взвешенных наносов под индивидуальной волной в начале группы больших волн, как правило, ниже, чем под такой же по высоте волной в конце группы.



**Рисунок 5 – Вертикальное распределение концентрации взвеси под волнами с одинаковой высотой в начале группы волн (отмечена буквой а) и в конце (отмечена буквой б). Н - глубина, z - расстояние от дна, c - концентрация**

Флуктуации концентрации взвеси когерентны перпендикулярной к берегу составляющей скорости воды в условиях деформированных волн только на частоте максимума спектра волнения. Под разрушающимися волнами флуктуации концентрации взвеси не когерентны флуктуациям скорости во всем диапазоне частот. Это означает, что в зоне разрушения волн временная изменчивость концентрации взвеси не определяется горизонтальной составляющей скорости водного потока или его моментов, и не может быть ею аппроксимирована.

**В главе 4** подробно рассматриваются пространственно-временные характеристики турбулентных структур в береговой зоне при разных режимах волнения. Оценивается влияние турбулентных движений воды на изменчивость поля концентрации взвешенных песчаных наносов.

В параграфах 4.1 и 4.2 представлен анализ хронограмм составляющих скорости воды и их турбулентных пульсаций, возвышения свободной

поверхности для зоны деформированных волн (Рис. 6). Пики турбулентной энергии острые и узкие, их длительность не превышает 1-2 с. Возникновение локальных максимумов турбулентной энергии может происходить один или два раза в течение периода одной волны.

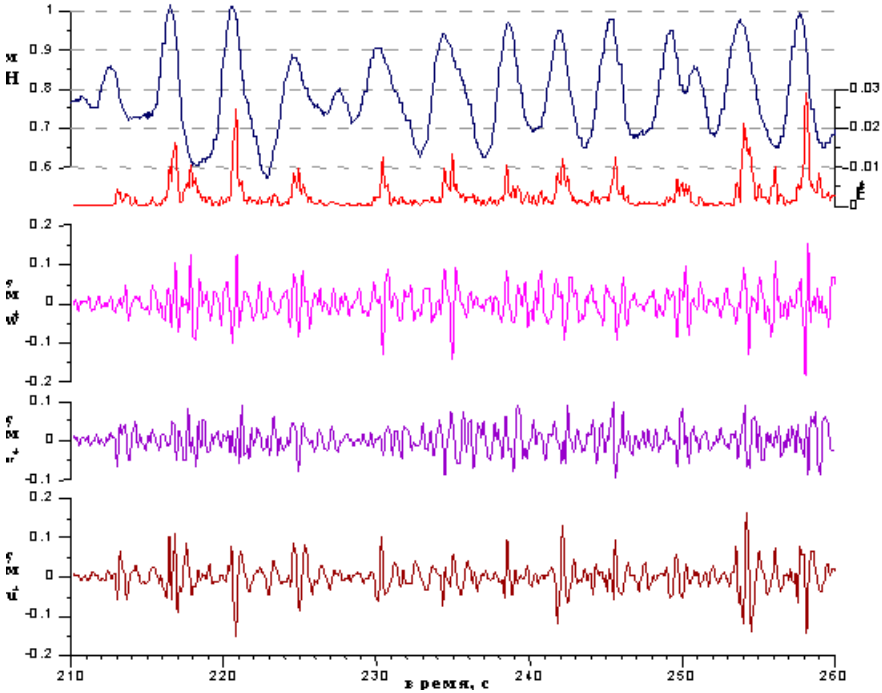
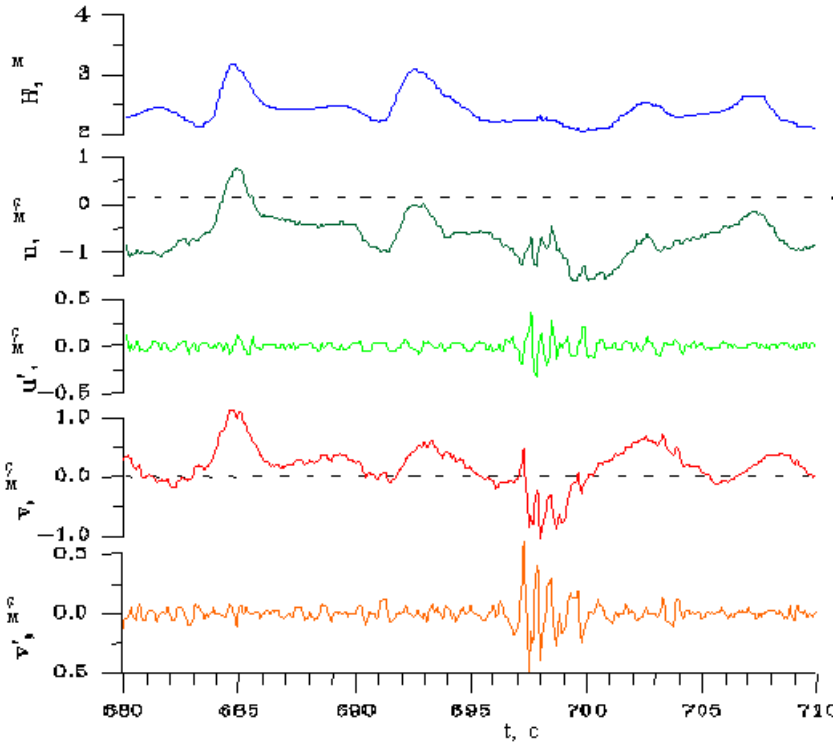


Рисунок 6 – Хронограммы записей возвышения свободной поверхности ( $H$ ), турбулентной энергии ( $E_t$ ) и составляющих вектора скорости турбулентных пульсаций ( $u_t$  - нормальная,  $v_t$  - вдольбереговая,  $w_t$  - вертикальная)

На рисунке 7 представлены хронограммы записей составляющих скорости воды и их турбулентного компонента, полученные при обрушении волн. Длительность пульсаций скорости воды достигает 10-15 секунд, что превышает период отдельной волны.

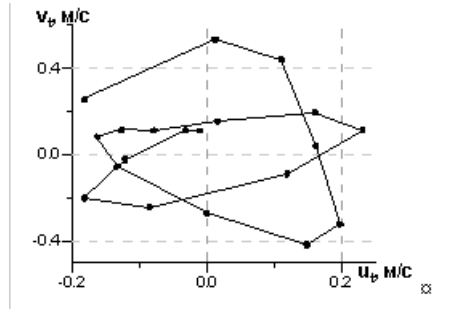


**Рисунок 7 - Хронограммы возвышения свободной поверхности ( $H$ ), составляющих скорости ( $u, v$ ) и турбулентных пульсаций ( $u', v'$ )**

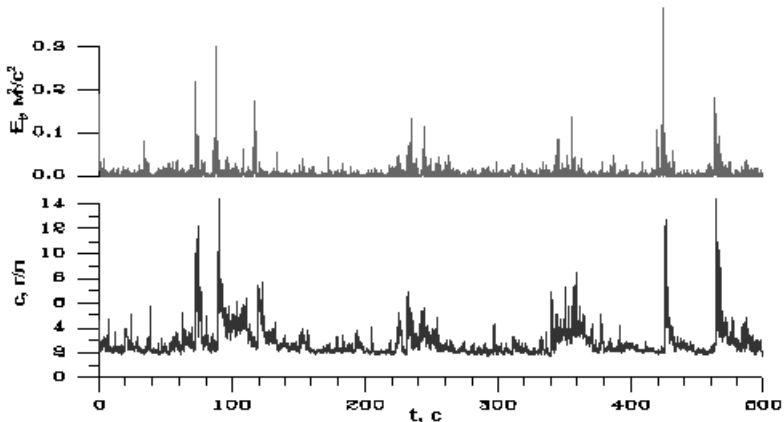
Синхронное измерение составляющих скорости позволило представить диаграмму вектора турбулентного компонента скорости в фазовом пространстве (Рис. 8). Траектория конца вектора скорости имеет форму неправильных эллипсов разных диаметров, что свидетельствует о прохождении в районе датчика серии вихрей (Косьян и др., 1999). Количество вихрей в цуге составляет от 3 до 7 штук. Диаметр отдельных вихрей в зоне разрушения волн составляет от 0.3 до 1.5 м, причем в пределах одной цепочки встречаются образования различной величины (Krylenko, 1997). С увеличением глубины происходит увеличение линейных размеров вихрей (Kos'yan et al., 1997).

Натурные данные подтверждают сделанный по данным лабораторных экспериментов К. Надаокой, Т. Кондохом, П. Зангом (Nadaoka, Kondoh, 1989; Zhang et al., 1994) вывод, что в береговой зоне турбулентность может генерироваться за счет неустойчивости потока в донном пограничном слое и разрушения гребней волн вблизи поверхности воды; а также показывают, что турбулентные вихри проникают далеко за пределы донного пограничного слоя.

**Рисунок 8 – Траектория конца вектора турбулентной составляющей скорости**



В параграфе 4.3 оценивается влияние турбулентных пульсаций скорости на концентрацию взвешенных наносов. Отмечена синхронность появления пиков концентрации и возрастания турбулентной энергии (Рис. 9), показано, что всплески турбулентности являются важным фактором формирования низкочастотной изменчивости концентрации взвешенного песка.



**Рисунок 9 - Фрагмент записи концентрации взвешенных наносов ( $c$ ) и турбулентной кинетической энергии ( $E_t$ )**

**В пятой главе** представлена модель флуктуаций концентрации взвешенных песчаных наносов в береговой зоне под деформированными волнами. В качестве исходных данных использовались результаты экспериментов "Sistex-99" и "Новомихайловка-03".

В основу модели положено диффузионное уравнение:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = w_s \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_s \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

где  $C(z,t)$  - концентрация взвешенных наносов;  $\varepsilon_s$  - коэффициент турбулентной диффузии частиц взвеси;  $w_s$  - скорость оседания частиц песка;  $t$  - время,  $z$  - вертикальная координата. Изменение концентрации взвеси во времени на любом расстоянии от дна определяется изменением по вертикали локального баланса потока взвеси за счет оседания частиц и за счет потока взвеси от дна.

Обобщенный коэффициент диффузии осадков рассматривается переменным по вертикали и представлен в виде (Kos'yan, 1985):

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_1(z) + \varepsilon_2(z) + \varepsilon_3(z)$$

Здесь  $\varepsilon_1(z)$  - вклад орбитального движения,  $\varepsilon_2(z)$  - вклад волнового течения,  $\varepsilon_3(z)$  - вклад диффузии в придонном слое. Оценки вертикального профиля обобщенного коэффициента диффузии показали, что вклад в него коэффициента  $\varepsilon_2(z)$  на два порядка меньше, чем от остальных слагаемых и им можно пренебречь.

На свободной поверхности воды поток взвеси принимается равным нулю. На нижней границе концентрация взвеси описывается выражением:

$C(0,t) = p(t)$ , где  $p(t)$  - функция локального выброса взвеси (pick-up функция), определяемая выражением:

$$p(t) = 3.3 \left( \frac{\theta(t) - \theta_{cr}}{\theta_{cr}} \right)^{1.5} \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{v^{0.2}}, \quad s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad - \quad \text{относительная}$$

плотность наносов,  $g$  - ускорение свободного падения (Zou et al., 2005).

Мгновенное значение параметра Шильдса отражает баланс сдвигающих и

удерживающих сил:  $\theta(t) = \frac{u_*^2(t)}{((\rho_s - \rho) / \rho) \cdot g \cdot \bar{d}_{50}}$ , где  $d_{50}$  - медианный диаметр

наносов;  $u_*^2(t)$  - максимальная сдвиговая скорость.

На основе анализа экспериментальных данных было установлено, что характер взвешивания песчаных наносов во многом определяется периодичностью следования групп высоких волн и количеством волн в отдельных группах. Взвешивание наносов при прохождении индивидуальных волн происходит не на протяжении всего периода, а в виде быстрого выброса облака взвеси. Этот факт учитывается введением коэффициента  $A$ , который, равен единице в фазу волны, когда происходит взвешивание, и нулю – в остальных случаях (Рис. 10а). Это касается и групп волн, рассматриваемых в терминах огибающей (Рис. 10б), т.е. коэффициент  $A=1$  только после прохождения максимальной волны в группе (Косьян и др., 2006).

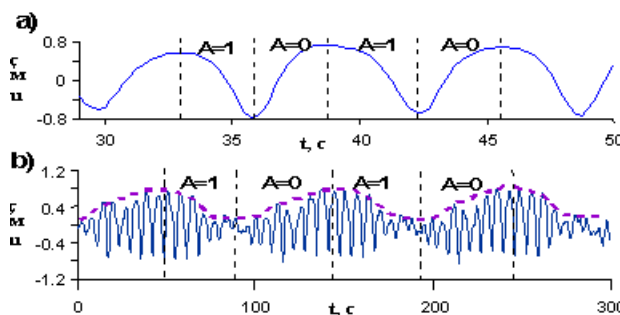


Рисунок 10 – Области значений коэффициента  $A$

Расчетные данные достаточно точно отражают моменты возникновения пиков концентрации и их количество. Полученные в результате модельных расчетов пики концентрации взвеси имеют меньшую длительность, чем измеренные и расчетная концентрация после резкого повышения значений снижается быстрее, чем в натуральных условиях (Рис. 11).

Расхождения в абсолютных значениях концентрации взвеси, возможно, обусловлены тем, что данная модель не учитывает адвективный перенос взвеси, изменчивость гранулометрического состава твердых частиц и изменение физических свойств потока при повышении концентрации взвеси.

Результаты спектрального анализа хронограмм концентраций взвеси (экспериментальной и модельной) приведены на рисунке 12. Все спектры концентрации характеризуются выраженными локальными максимумами на частотах 0.13 и 0.26 Гц. Модельный ряд концентраций взвеси статистически соответствует экспериментальному.

Разработанная модель прогноза концентрации взвешенных наносов под деформированными волнами учитывает влияние групповой структуры волнения и параметров индивидуальных волн на взвешивание осадков. Модель хорошо отражает все качественные особенности взвешивания наносов (моменты возникновения пиков концентрации, их количество и т.д.) в рассматриваемых условиях волнения при выбранных параметрах.

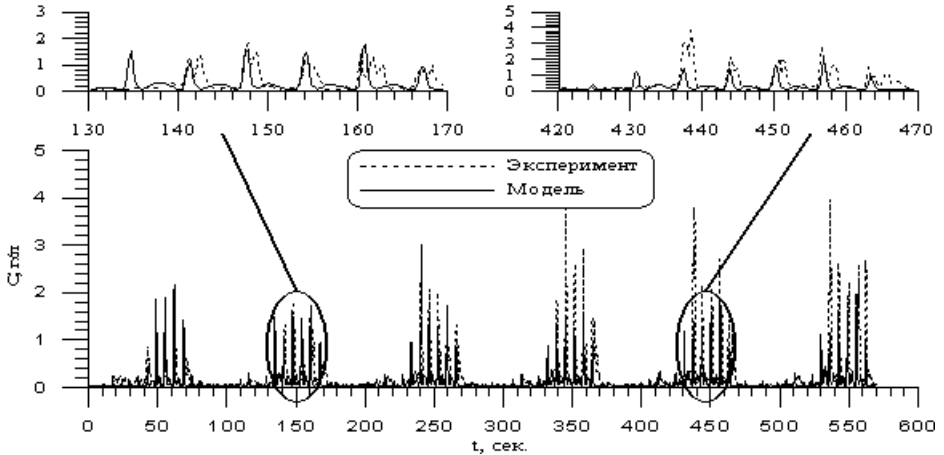
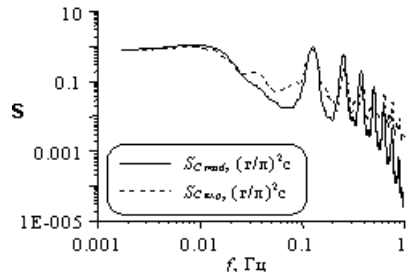


Рисунок 11 - Экспериментальные и модельные концентрации взвешенных наносов под выделенными группами волн

Рисунок 12 – Спектры концентрации взвеси (экспериментальной ( $S_{C_{exp}}$ ) и модельной ( $S_{C_{mod}}$ ))



В **Заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

Полученная с использованием современных методов и приборов уникальная база экспериментальных данных позволила выполнить исследование механизмов и закономерностей взвешивания песчаных наносов штормовыми волнами.

В работе рассмотрены основные особенности изменчивости концентрации взвеси с дискретностью меньшей, чем период волн. Установлено, что изменчивость вертикального распределения концентрации взвешенных наносов определяется как параметрами индивидуальных волн, так и низкочастотными характеристиками волнения. Описаны условия развития турбулентности в волновом потоке, пространственно-временные характеристики турбулентных областей и влияние турбулентности на концентрацию взвешенных наносов. Подтверждено, что величина кинетической энергии турбулентности является наиболее существенным фактором, влияющим на формирование поля концентрации взвешенных наносов в прибойной зоне.

Представленная модель прогноза пространственно-временной изменчивости концентрации взвешенных песчаных наносов под деформированными волнами с учетом конвективных механизмов распространения взвеси, параметров индивидуальных волн и групповой структуры волнения, хорошо отражает все качественные особенности взвешивания наносов в рассматриваемых условиях.

В дальнейшем, используя архивные данные и результаты нового российско-германского лабораторного эксперимента, проведенного в Большом волновом канале Ганноверского университета в 2006 году, планируется:

- продолжить изучение пространственно-временной изменчивости концентрации взвешенных наносов, как в зоне деформированных волн, так и под разрушающимися волнами;
- провести исследование количественных соотношений между изменениями концентрации взвешенных осадков, крупномасштабной турбулентностью и диссипацией волновой энергии в прибойной зоне;
- совершенствовать представленную модель взвешивания донных осадков и разработать модель временных и пространственных изменений поля концентрации взвешенных осадков в прибойной зоне.

Полученные в работе сведения о механизмах формирования поля взвешенных песчаных наносов являются необходимым этапом познания и дают возможность более обоснованно ставить задачи для будущих исследований и составлять программы экспериментов. Выявленные соотношения между концентрацией взвешенных осадков, параметрами волнения и турбулентной кинетической энергией важны для верификации существующих моделей и будут являться основой для разработки новых. Результаты проделанной работы могут найти практическое применение при реализации проектов по освоению прибрежной зоны моря, связанных с береговым строительством, проектированием портов и защитных сооружений, обеспечением экологической безопасности.

**Основное содержание диссертации изложено в  
следующих работах:**

1. Перемежаемость турбулентности в прибойной зоне и ее влияние на взвешивание песка // Океанология, 1999. – Т.39, №2. – С. 298-305. (соавторы: Косьян Р.Д., Кунц Г., Кузнецов С.Ю., Пыхов Н.В.)
2. Экологические аспекты экономического развития Российского побережья Черного моря // Сборник «Проблемы экологии Азово-Черноморского бассейна: современное состояние и прогноз» 2-ой международной конференции «Понт Эвксинский». - Севастополь, 2001. - С. 124-125.
3. Моделирование флуктуаций концентрации взвешенных наносов над гладким дном под воздействием волнения с выраженной групповой структурой // Вестник Южного Научного Центра РАН, 2006. – Т.2, №4. – С. 52-59. (соавторы: Р.Д. Косьян, К. Винсент, Б.В. Дивинский)
4. Intermittence of turbulence and sand suspending events during storm // Abstr. of the 25<sup>th</sup> Intern. Conf. "Coastal Engineering 96", Orlando, USA, 1996. – P. 334-335. (with Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S., Pykhov N.)
5. Sand suspension and intermittence of turbulence in the surf zone. // Proc. of the 25 Int. Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil engineering, New York, 1997. – P. 4111-4119. (with Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V.)

6. Turbulent vortexes and suspended sand concentration // Abstr. of the 3<sup>th</sup> International MEDCOAST Programme on «Beach management in the Black sea». Varna, Bulgaria, 1997. – № 8.
7. Study of beach state and coastal protection in the neighborhood of Sochi City. // Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on the Mediterranean Coast Environment Medcoast 05, Pine Bay Holiday Resort, Kusadasi, Turkey, 2005. – P. 1007-1016. (with Kos'yan R., Petrov V., Yaroslavsev N.)
8. Peculiarities of instantaneous vertical distribution of suspended sediment in the surf zone // Abstr. of the 30<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering (ICCE), San Diego, 2006. – № 106. (with Kos'yan R.)
9. Fluctuations of instantaneous vertical distribution of suspended sediment in the surf zone // Proc. of the 30<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering (ICCE), New York, 2007. (with Kos'yan R.D., Vincent C.E.)