

Российская академия наук
Институт океанологии имени П.П.Ширшова

ЮЖНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ

УДК
ВГК ОКП
№ госрегистрации
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор ЮО ИО РАН, к.т.н.

_____ А.А.Покрышкин

« ____ » _____ 2006 г.

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ЗА 2006 ГОД ПО ТЕМЕ:**

**«ДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ: НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗМЕРЕНИЙ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ, ЭРОЗИЯ БЕРЕГОВ»**

2005-РИ-12.0/004/099

Государственный контракт № **02.434.11.7110** от «07» ноября 2005 г.
в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям
развития науки и техники» на 2002-2006 годы»

Руководитель НИР
доктор географических наук, профессор

Р.Д.Косьян

Геленджик 2006

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель Доктор географических наук, профессор	Р. Д. Косьян
Исполнители темы Доктор физико-математических наук, профессор	С. М. Анцыферов
Кандидат физико- математических наук	Т. М. Акивис
Кандидат технических наук	И. С. Подымов
Кандидат физико- математических наук	Н. В. Пыхов
Кандидат географических наук	Б. В. Дивинский
Научный сотрудник	А. Д. Кочергин
Научный сотрудник	М. В. Крыленко
Инженер-электроник	О. В. Пушкарев

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 81 страниц, 58 рисунков, ссылки на 28 источников.

БЕРЕГОВАЯ ЗОНА, ДИНАМИКА, ВОЛНЕНИЕ, ВОЛНОВАЯ ЭРОЗИЯ, ПОТОКИ НАНОСОВ, ВЗВЕШЕННЫЕ НАНОСЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, БЕРЕГОЗАЩИТНОЕ СООРУЖЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ, ОПАСНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, АБРАЗИЯ, АККУМУЛЯЦИЯ НАНОСОВ, ПЛЯЖ

Настоящий отчет содержит результаты работ второго этапа исследований по проекту «Динамика береговой зоны: новые технологии измерений транспорта наносов, эрозия берегов» (2005-РИ-12.0/004/099), выполняемому по Государственному контракту № 02.434.11.7110 от 7 ноября 2005 г. в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы».

В соответствии с ТЗ Госконтракта работы этого этапа включали:

- натурные исследования состояния берегов Греции и анализ хода эрозионных процессов на них с целью сопоставления с береговыми процессами на южных морях России;
- лабораторный эксперимент в Большом волновом канале Береговой исследовательской станции Университета Ганновера и Технического университета Брауншвейга;
- моделирование распределения и флуктуации концентрации песчаных наносов, взвешенных волнами с выраженной групповой структурой над плоским дном.

По всем направлениям исследований получены вполне удовлетворительные результаты.

Береговая линия Греческого полуострова и островов, входящих в состав Греции, по сравнению с площадью территории весьма значительна. Она представлена множеством форм рельефа, таких как скалистые берега, клифы, пляжи и дельтовые побережья. Строение многих участков сходно с таковым ряда участков черноморского побережья России и Грузии. До 75-80% береговой линии Греции, составляют клифы и скалистые берега, которые относительно устойчивы к процессам береговой эрозии. Но там, где клифы состоят из более мягких пород, т.е. сланцы и флиши, эрозия протекает также быстро, как и на российских берегах Черного моря. Выполненное более детальное обследование острова Родос позволило выделить на его побережье ряд литодинамических систем и дать их краткое описание.

Поскольку для существенного прогресса в изучении развития береговой зоны и ее защиты необходимы надежные количественные методы прогноза, базирующиеся на

современных моделях движения наносов, в рамках проекта осуществлено физическое и математическое моделирование процессов перемещения наносов волновым потоком. Эта часть работы выполнялась в лучшем в Европе волновом канале. Сформирован солидный банк уникальных экспериментов. Математическое моделирование распределения и флуктуации концентрации наносов, взвешенных штормовым волнением, проведено на базе современных теоретических разработок и с использованием результатов лабораторного эксперимента «SISTEX'99», выполненного ранее в том же канале.

Для решения поставленных задач использовались многочисленные публикации, отчеты по научно-исследовательским работам и экспедиционным обследованиям берегов, фондовые материалы Института океанологии и других организаций по исследуемой тематике, а также итоги собственных натуральных и лабораторных исследований.

Результаты проекта будут способствовать оптимизации управления береговой зоной и внесут вклад в реализацию концепции устойчивого развития прибрежной зоны.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Исследование побережья Греции.....	8
а. Общее строение прибрежной зоны.....	8
1.2. Типы береговых линий Греции.....	10
1.2.1. Клифы и скалистые берега.....	10
1.2.2. Клифы с пляжами.....	16
1.2.3. Аккумулятивные берега – дельтовые береговые линии.....	16
1.2.4. Берега и барьеры – дюны.....	17
1.2.5. Лагуны.....	21
1.2.6. Дельты.....	22
1.3. Проблемы берегозащиты и эрозии некоторых участков побережья Греции... ..	26
1.4. Остров Родос.....	28
2. Лабораторный эксперимент «Ганновер’ 2006».....	42
2.1. Задачи эксперимента.....	42
2.2. Приборы.....	42
2.3. Калибровки приборов.....	47
2.4. Первичные данные.....	51
2.5. Волновой канал.....	54
2.6. Программа эксперимента.....	57
2.6.1. Режимы волнения, характерные для Черного моря.....	57
2.6.2. Режимы волнения с модельным рядом спектров.....	61
2.6.3. Статистические данные по полученной информации.....	64
3. Моделирование распределения наносов, взвешенных под воздействием волнения с выраженной групповой структурой.....	67
3.1. Постановка задачи.....	67
3.2. Условия базового эксперимента.....	68
3.3. Модель распределения взвешенных наносов.....	69
3.3.1. Основные положения.....	69
3.3.2. Определение коэффициента диффузии.....	69
3.3.3. Граничные условия.....	70
3.3.4. Определение максимальной сдвиговой скорости	71
3.4. Исходные данные.....	71
3.5. Результаты.....	72
Заключение.....	78
Список использованных источников.....	80

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью проекта «Динамика береговой зоны: новые технологии измерений транспорта наносов, эрозия берегов» (шифр: 2005-РИ-12.0/004/099) является создание новых представлений о движении наносов и развитии берегов на основе более полных знаний о динамических процессах, полученных из наблюдений, выполненных с помощью новых технологий и предоставление менеджерам береговой зоны, инженерам и ученым достоверных способов прогноза последствий взаимодействия природы и человеческой деятельности в прибрежной зоне.

Главными задачами проекта, призванными обеспечить существенное продвижение в изучении динамики береговой зоны и разработке прикладных методов прогноза, в том числе, прогноза эрозии берегов, являются:

- сбор и анализ данных по развитию и эрозии берегов с целью создания базы для геоморфологического анализа и верификация динамических моделей по этим данным;
- продвижение в понимании механизмов формирования поля взвеси и потока наносов;
- развитие представлений о взаимосвязанных изменениях структуры взвесенесущего потока и микрорельефа дна, формируемого потоками разного генезиса;
- изучение механизмов взвешивания наносов и оценка соотношения вкладов различных механизмов при воздействии волн;
- оценка роли крупномасштабной турбулентности в прибойной зоне в формировании потока наносов;
- разработка нового подхода для описания осредненного профиля концентрации взвешенных наносов, который будет учитывать влияние гидродинамических, морфологических и седиментологических параметров;
- разработка нового поколения моделей перемещения наносов штормовым волнением.

Поскольку эти задачи по существу являются актуальными для всех прибрежных стран, международная кооперация в их решении оказывается целесообразной и эффективной. Именно в таком сотрудничестве с нашими зарубежными партнерами осуществлялись работы по данному проекту. Работы включали натурные наблюдения и оценку эрозионной деятельности моря, осуществляемые на побережье Греции и России. И поскольку для существенного прогресса в изучении развития береговой зоны и ее защиты необходимы надежные количественные методы прогноза, базирующиеся на современных

моделях движения наносов, в рамках проекта осуществлялись физическое и математическое моделирование процессов перемещения наносов волновым потоком.

Физическое моделирование выполнялась в лучшем в Европе волновом канале Береговой исследовательской станции, подведомственной Университету г. Ганновера и Техническому университету г. Брауншвейга (Германия). Выбор лабораторной установки обусловлен тем, что этот волновой канал позволяет моделировать динамические процессы береговой зоны практически без искажения масштаба, что чрезвычайно важно, так как при ином масштабе моделирования оказывается невозможным одновременно соблюсти подобие гидродинамических и литодинамических процессов.

Оптимальным путем развития исследований следует считать проведение вместе с физическим моделированием, результаты которого мы можем использовать после их обработки и анализа, выполнение математического моделирования на основе уже имеющегося экспериментального материала. В этом смысле значительную ценность представляют данные международного эксперимента «SISTEX'99», проведенного в том же Большом волновом канале. Они уже могут составить серьезную базу для разработки и тестирования математических моделей, а кроме того, позволят провести сопоставление с новыми данными экспериментов.

Исходя из этого и была поставлена задача провести моделирование флуктуаций концентрации взвешенных песчаных наносов над гладким дном под волнами с выраженной групповой структурой. Такая постановка определяется тем, что имеющиеся модели описывают распределение осредненных по времени значений концентрации взвешенных наносов в волновом потоке, но не учитывают временную изменчивость потока наносов, а как показали предыдущие исследования, расчеты, основанные на таком подходе, могут на порядки отличаться от реальных концентраций.

Нам представляется, что комплексный подход, сочетающий натурные исследования, уникальный лабораторный эксперимент и математическое моделирование, является оптимальным путем решения задач проекта.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОБЕРЕЖЬЯ ГРЕЦИИ

1.1. Общее строение прибрежной зоны

Береговая линия Греческого полуострова и островов, входящих в состав Греции, по сравнению с площадью территории (примерно 130000 км²) весьма значительна. Она составляет более 18000 км и представлена множеством форм рельефа, таких как скалистые берега, клифы, пляжи и дельтовые побережья. Строение многих участков сходно с таковым ряда участков черноморского побережья России и Грузии.

Общее строение Греческого полуострова и примыкающих к нему островов достаточно полно описаны в работах греческих ученых (Anagnostou et al, 2003, 2005 и др). Согласно сформулированным ими представлениям береговая линия Греции представлена множеством форм рельефа, таких как клифы и скалистые берега, пляжи и дельтовые побережья. Образование и постоянное изменение этих форм рельефа происходит под действием ряда морфообразующих факторов, в том числе геологических и геодинамических, геоморфологических и некоторых климатических факторов, таких как ветры, которые определяют волновой режим, и дожди, контролирующие поставку наносов к берегам.

Греческий полуостров и связанные с ним островные комплексы составляют часть альпийского горообразования. Геологические структуры Греции имеют преобладающее СЗ–ЮВ направление, что вместе с СЗ–ЮВ / СВ–ЮЗ системой разломов определяет геодинамический режим полуострова.

Литология Греческого полуострова (рис. 1.1) представлена альпийскими формациями, которые подразделяются на изверженные породы ~10%, карбонатные породы ~ 25-30%, сланцы ~10-15%, флиш 15% и пост-альпийскими формациями (пески, песчаники, глина и глинистые породы, мергели, известняки) ~35% .

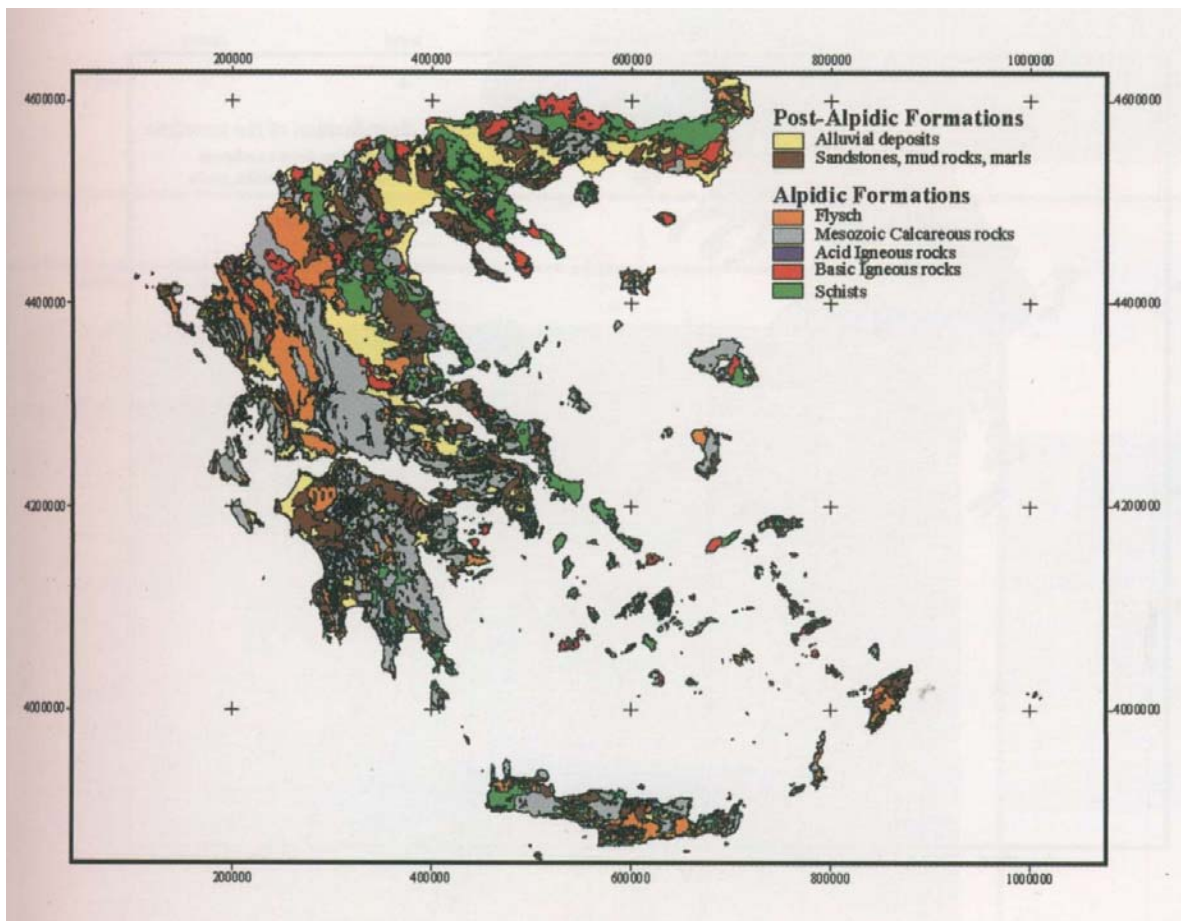


Рис. 1.1. Геологическая структура Греческого полуострова и примыкающих островов

Геодинамическая эволюция Греции сопровождалась быстрым изменением прибрежных форм рельефа. Большую часть береговой линии Греции, до 75-80%, составляют клифы и скалистые берега. Эти берега состоят из твердых карбонатных пород и изверженных пород, которые относительно устойчивы к процессам береговой эрозии. С другой стороны, там, где клифы состоят из более мягких пород, т.е. сланцы и флиши, эрозия протекает более быстро.

5% береговой линии составляют клифы с пляжами (прибрежными полосами) на геологическом основании пост-альпийских формаций, состоящих из мягких песчаников, глинистых пород и мергелей. Существенную часть береговой линии (~15%) составляют аккумулятивные берега, сформировавшиеся там, куда поставлялся обломочный материал. Эти области в основном являются ловушками тектонического происхождения, в которых речные наносы создают дельтовые береговые линии.

Преобладающее воздействие на берега Греции оказывают волны, генерируемые ветрами северного направления, а также южными штормовыми ветрами с открытой части Средиземного моря.

1.2. Типы береговых линий Греции

1.2.1. Клифы и скалистые берега

Этот тип берегов преобладает во всей области Греции. Клифы и скалистые берега найдены большей частью вдоль разломных систем. Морфология клифов связана с литологией и с тектоническими движениями, которые характеризуются как поднятием, так и опусканием тектонических блоков.

Клифы и скалистые берега найдены в центральной части западного берега Греции – в Ионическом море и на некоторых Ионических островах в южном Пелопоннесе, в северной части залива Коринтиакос, в центральной части восточного побережья Греции, на некоторых берегах Македонии и на большинстве Эгейских островов.

Простейшие клифы найдены там, где породы разрушены морской эрозией вдоль разломов. Встречаются как высокие, так и низкие клифы. Эрозия лицевой стороны клифа может привести к формированию в основании клифа берега, состоящего из обломков пород. Разломная система и литология, характеризующаяся карбонатными породами, являются факторами, способствующими формированию клифов такого типа (рис. 1.2).



а



б

Рис. 1.2. Клифы. *а*- клифы вдоль разломов; *б* - клифы с формированием пляжа в основании из известняковых пород, остров Лескос. Красным кружком отмечен значительный оползень, представляющий массы пород, обрушившихся с клифа и аккумулирующихся на пляже, перемещаясь под действием волн

Северные берега залива Коринтиакос (рис. 1.3), который является очень активной тектонической областью и характеризуется интенсивной разломной системой СВ/ЮЗ – В/З направления, что приводит к образованию множества тектонических блоков, претерпевающих независимые вертикальные движения. Эта блоковая фрагментация проявляется в образовании островного массива, отделенного и от мыса, и от сложной береговой линии.



Рис. 1.3. Клифовые берега в активной области, разделенной на тектонические блоки в северной части залива Коринфиакос

Основным направлением тектонических движений является опускание. Подводные выемки в карбонатных береговых породах образованы в основном физико-химической эрозией с участием биологической эрозии. Они были отмечены ниже существующего положения уровня моря. Тектонические блоки могут также наклоняться и переворачиваться. В этих случаях выемки, образованные на карбонатном клифе, поднимаются (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Тектонические блоки на карбонатных клифовых берегах северной окраины залива Коринфиакос (центральная Греция). Видно формируемые морем выемки

В некоторых очень активных тектонических областях происходит эпизодическое поднятие тектонических блоков. Эти процессы оставляют следы на скалистых берегах, формируя серии морских каверн. Таковую картину можно наблюдать на ЮЗ берегах Родоса (рис.1.5).

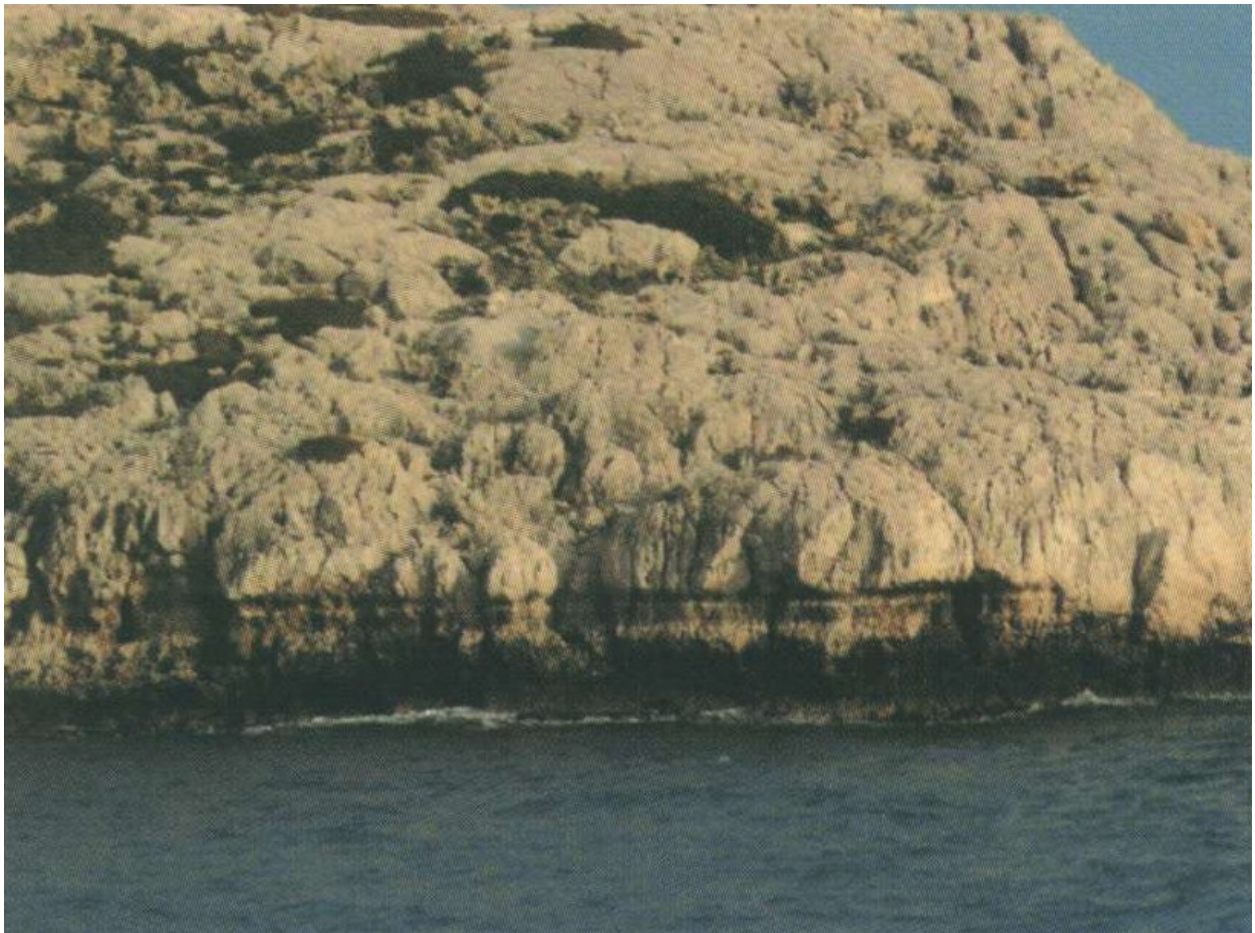


Рис. 1.5. Ряд образованных морем каверн в эпизодически поднимающейся области на ЮВ берегу острова Родос.

Берега, состоящие из карбонатных пород – наиболее распространенный тип скалистых берегов в районе Греции, представленном более пологими уклонами на прилежащих участках суши (рис. 1.6). В этих областях основной тенденцией тектонических движений является опускание.



Рис. 1.6. Скальные берега на сравнительно пологих склонах на известняковом основании

Области с литологическим основанием из пород вулканического происхождения. Они являются тектонически более стабильными. Морская эрозия воздействовала на эти породы в течение долгого времени, разрушая их и создавая округлые эрозионные поверхности скальных блоков и осаждающие в промежутках между ними продукты выветривания: крупнозернистые пески, состоящие из кварца и полевых шпатов (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Берега из вулканических пород с песчаными карманными пляжами, заполненными продуктами выветривания этих пород (западная часть острова Наксос - Кикладес)

Некоторые берега характеризуются береговыми платформами, которые, как правило, могут быть сформированы интенсивным волновым воздействием. Для этих образований предпочтительным является термин волноприбойная платформа. Эти поверхности выравнивания простираются от основания клифа до уровня ниже уровня моря. Процессы эрозии и выветривания формируют и изменяют прибрежную микро-топографию. Наиболее важным для формирования прибрежных платформ процессом является абразия, происходящая за счет переносимых волнами поперек берега обломков породы (песок, галька). Волны и произведенные эрозией обломки пород являются мощными факторами абразии. На рис. 1.8 показана прибрежная платформа, образованная воздействием волн на древние дюны на западном берегу острова Наксос в Кикладес.

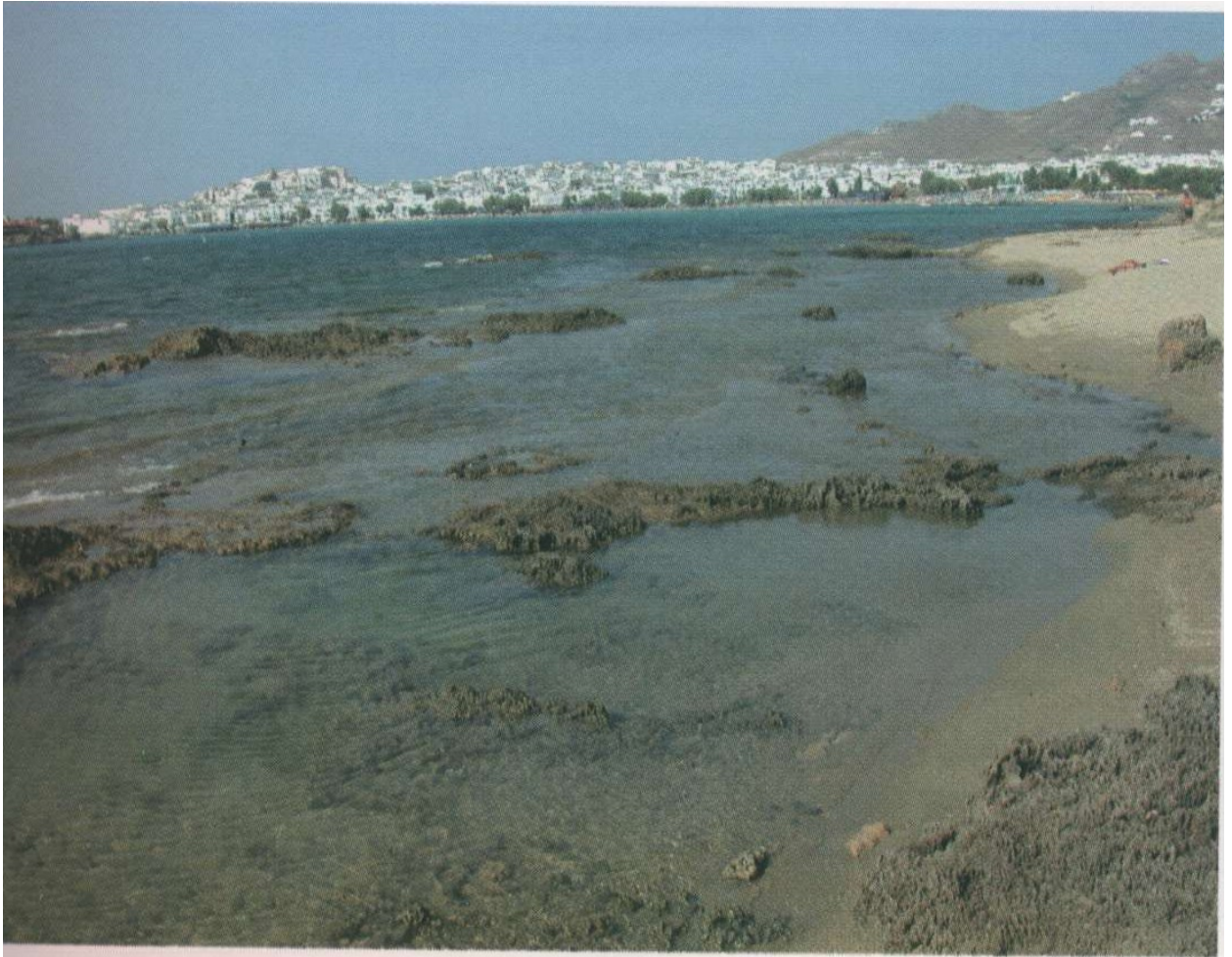


Рис. 1.8. Береговая платформа, сформированная действием волн на более древней дне на западном берегу острова Наксос – Кикладес.

В некоторых случаях абразии обломки породы захватываются прибрежной платформой и в процессе переноса волнами могут образовывать круглые выбоины. На прибрежной платформе древних окаменевших дюн на западном берегу Пелопоннеса круглые выбоины вырыты действием волн, генерируемых СЗ и ЮЗ ветрами (рис. 1.9). Фрагментами породы, участвующими в этом процессе абразии и формировании выбоин являются зерна песка. Диаметр выбоин составляет от 10 до 50 см, а глубина – от 10 до 30 см.



Рис. 1.9. Формирование круглых каверн на береговой платформе более древней литифицированной дюны. Западное побережье Пелопоннеса.

1.2.2. Клифы с пляжами

Берега этого типа представляют собой узкие полоски пляжей у основания клифов на пост-альпийских плио-плейстоценовых (Неогеновых) геологических формациях. Эти формации являются тектонически-приподнятыми относительно мягкими осадочными породами, состоящими из песчаников, аргиллитов и мергелей и подвержены относительно быстрым эрозионным процессам. Эрозия этих пород создает крутые обрывистые клифы различной высоты (обычно 10-50 м) и продукты эрозии, которые формируют узкие полосы пляжей у основания клифов. Этот тип берега часто встречается в областях, где встречаются пост-альпийские формации. Такие формации обнаружены на берегах восточной Греции, северного Пелопоннеса, островов Крит и Родос и в северной части Греции. Пример берегов такого типа показан на рис. 1.10. На этом рисунке ясно виден крутой обрыв клифа на плио-плейстоценовой геологической формации, так же, как узкий пляж у основания обрыва.



Рис. 1.10. Крутой клиф на плио-плейстоценового геологического образования и узкий пляж в его основании. Западное побережье залива Термаикос на СЗ Эгейского моря

1.2.3 Аккумулятивные берега – дельтовые береговые линии

Многие типы берегов, общей характеристикой которых является возможность расти за счет осадконакопления, могут быть классифицированы как аккумулятивные.

Осадочный материал поступает на аккумулятивные берега из различных источников. Основная его часть доставляется реками, как большими, с большой площадью водосбора и несущие большие количества осадочного материала, так и реками, дренирующими крутые внутренние районы.

В группу аккумулятивных берегов входят пляжи и связанные с ними дюны, береговые барьеры, лагуны, а также более важные и непрерывно меняющиеся дельтовые берега.

Эти типы берегов имеют относительно большую протяженность во многих областях Греческого полуострова и островных комплексов Эгейского и Ионического морей.

1.2.4. Берега и барьеры – дюны

Пляжи состоят из неконсолидированных песчаных и гравийных осадков на берегу и имеют различные формы. Они могут быть длинными и искривленными или могут представлять собой изогнутые бухтовые пляжи между скальными мысами. Очень хороший пример такого типа пляжей показан на рис. 1.11.



Рис. 1.11. Пример длинного пляжа на ЮЗ Пелопоннеса

Береговые барьеры представляют собой узкие полосы суши, полностью состоящие из песчаного материала. Превосходным примером являются береговые барьеры западной Греции, т.е. дельтовые отложения реки Ахелус (рис. 1.12). Прибрежный барьер сформирован преобладающим вдольбереговым транспортом пляжевого материала с запада на восток и замыкает лагунную систему Мезолонги.

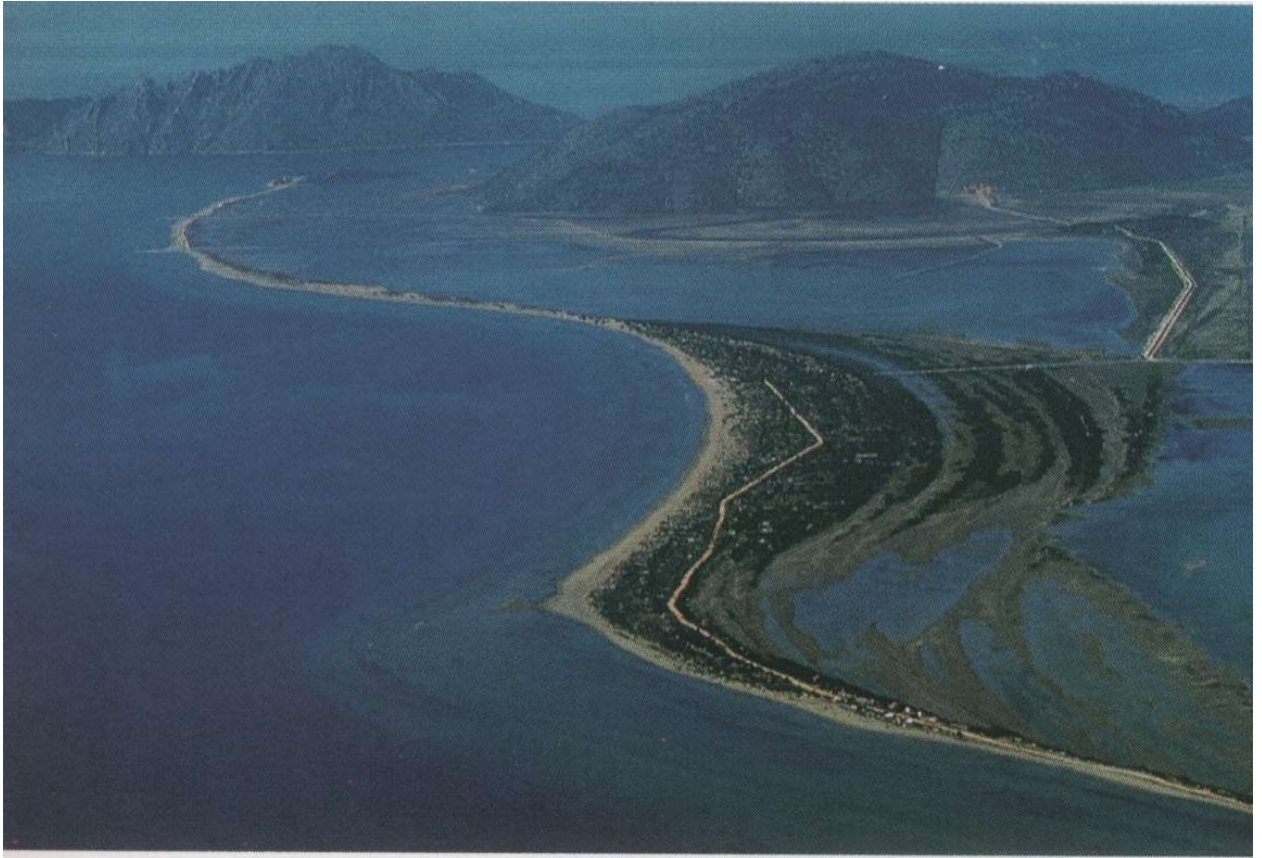


Рис. 1.12. Прибрежные барьеры, сформированные преобладающим транспортом пляжевых наносов и его лагунная система. Дельтовые отложения реки Акелы на западной Греции.

Аккумулятивные черты тесно связаны с пляжами и косами различных типов, сформированными аналогичными процессами. Примером непрерывно меняющейся косы приведен ниже, в разделе, посвященном проблемам острова Родос.

Особой формацией, связанной с пляжами, является пляжевая скала. Пляжевые скалы – это твердые породы, образующиеся на пляжах в результате цементации пляжевого материала. Пляжевые пески и галька могут быть цементированы посредством осаждения карбонатов (кальцита и арагонита) в зоне смешения, там, где пресная вода смешивается с морской. Пляжевые скалы часто встречаются на пляжах Греции, на Аттике, на западном Пелопоннесе и на Эгейских островах (пример – на рис. 1.13).

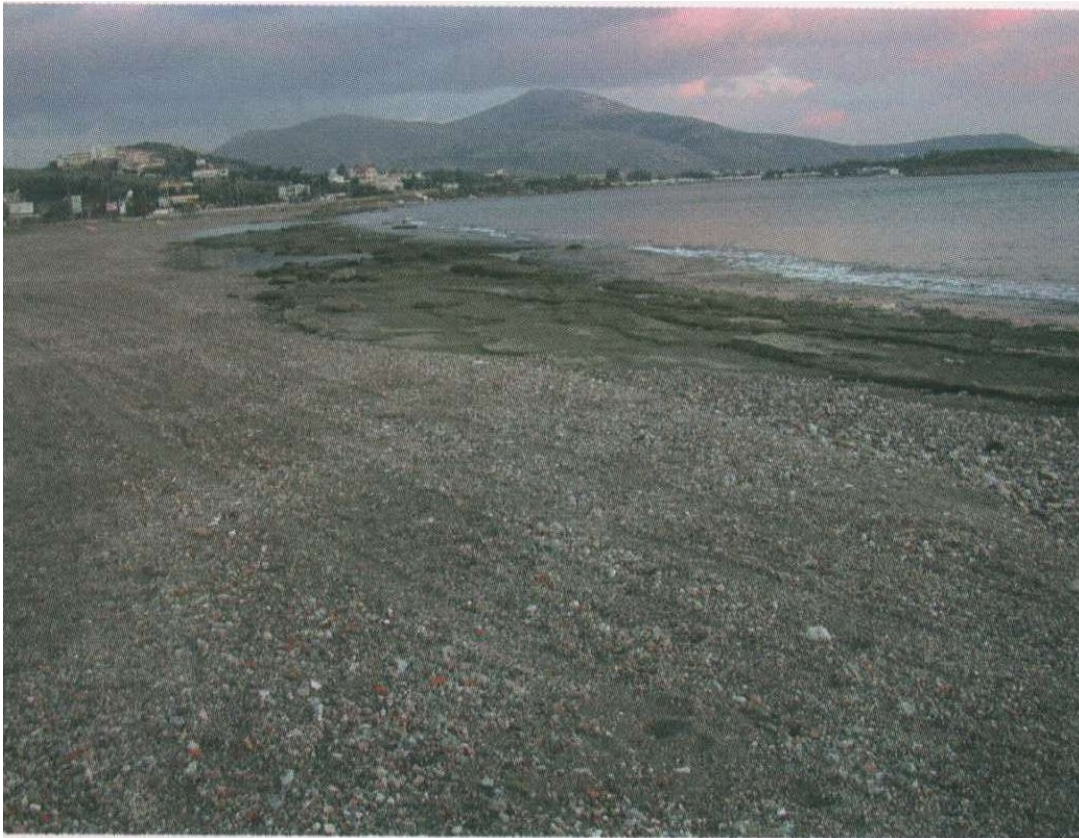


Рис. 1.13. Пляжевые скальные образования на побережье залива Сароникос, Атика

Береговые дюны обычно формируются там, где песок выдувается с берега и аккумулируется в задней части пляжа. Их форма и размеры зависят от источника, откуда песок выдувается ветром, от характеристик ветрового потока, от скоростей эолового переноса и конфигурации областей эрозии и осадения. На Греческом полуострове прибрежные дюны сформировались во многих местах (примеры – на рис. 1.14).



Рис. 1.14. Береговые дюны на пляже острова Кикладес с высотой от ~ 1.5 до 2 м (слева) и на западном Пелопоннесе, где береговые дюны достигают высоты 7-8 м и покрыты разнообразной растительностью (справа).

1.2.5. Лагуны

Прибрежные лагуны – относительно мелководные области, отделенные от берега песчаным барьером. Вдоль побережья Греции сформировалось множество лагун. Наиболее важные лагунные комплексы находятся в заливе Амвракикос и в области Месолонги-Эйтоликон. Кроме того, можно назвать лагуну Лефкас в северной части острова Лефкас в Ионическом море, лагуну Араксос в северо-западной части Пелопоннеса, лагуну Каиафа в западной части Пелопоннеса, лагуну Гиалова в Наваринском заливе на юго-западе Пелопоннеса. Размеры этих лагун составляют несколько квадратных километров.

Просты и временные лагунные формации найдены там, где устье реки может быть перегорожено валом, образованным волнами. На рис. 1.15 показана временная лагунная формация в устье реки Айсонас (Мавронери) на западе берега Термаикоса (СЗ Эгейского моря). Лагуна такого типа формируется, когда речной поток выносит осадки после сильного дождя. Временная лагуна реки Айсонас сформировалась после чрезвычайно сильных ливней в декабре 2002 г. Действие волн постепенно восстанавливает эту лагуну после возвращения к обычным погодным условиям.



Рис. 1.15. Временные лагунные образования в устье реки Айтонас (Мавронери) на западном побережье Термаикоса (СЗ Эгейского моря). Эти формации являются местом отдыха и гнездования птиц (фото справа).

Другой тип лагун – это длинные и узкие лагуны, вытянутые параллельно берегу и отделенные от моря валом. Одним из примеров может служить лагуна Каиафа на западе Пелопоннеса.

В некоторых случаях геологическое основание действует как мыс и регулирует и песчаный барьер, и форму лагуны. Наилучшим примером лагуны такого типа на Греческом полуострове является лагуна Лефкас в северной части острова Лефкас в Ионическом море (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Лагуна в северной части острова Левкоса в Ионическом море, где геологическое основание действует как мыс, являющийся барьером для наносов, регулирующим форму лагуны. Аэрофото слева и фото с земли справа.

1.2.6. Дельты

Термин дельта используется для того, чтобы геоморфологически определить аккумулятивные низменности, формирующиеся вокруг устьев рек. Поставка реками воды и количество выносимых наносов зависит от геологии и геоморфологии водосборного бассейна, а также от климата, определяющего выветривание пород, эрозию и перенос продуктов выветривания.

Размеры и форма дельт Греции зависят, в основном, от двух факторов: скорости поставки наносов реками и влияния волн на накопление осадков.

В районе Греческого полуострова приливные колебания относительно малы, что сокращает роль приливов в формировании дельт.

Руководствуясь этими двумя факторами, можно классифицировать дельты Греции по типам:

При относительно бедной поставке речного материала и слабой энергии волн может сформироваться дельта разветвленной формы. Хорошим примером такой дельты является дельта Аксиоса в заливе Термаикос (СЗ Эгейского моря) (рис. 1.17).

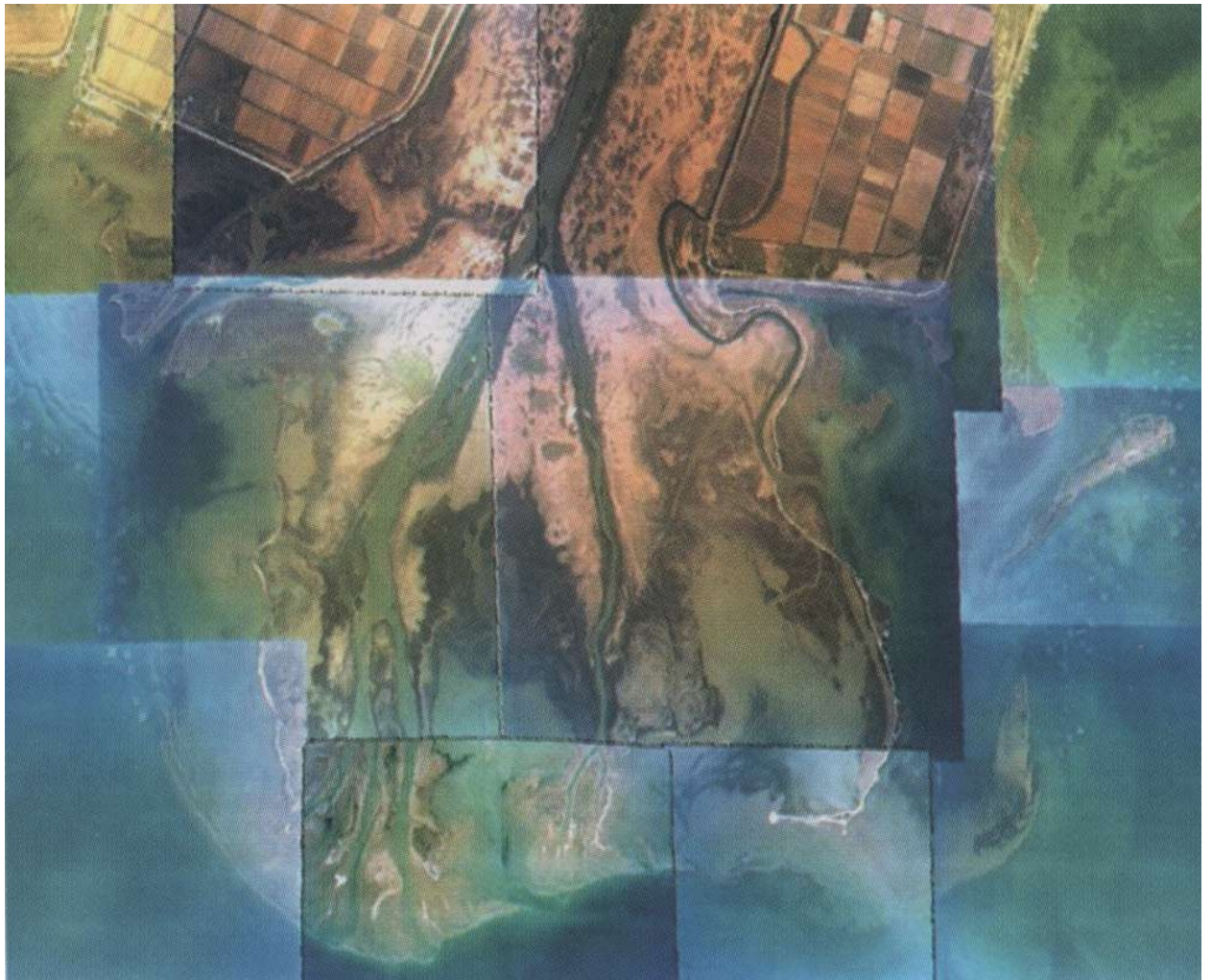


Рис. 1.17. Дельта разветвляющегося типа, сформированная в основном поставкой речного материала и слабой энергией волн (дельта Аксиос в заливе Термаикос – СЗ Эгейского моря)

При более сильном волновом воздействии формируется более гладкая остроконечная форма. Дельта Ахелуса в восточной Греции (рис. 1.18) сформирована большими объемами осадков, доставленных в устье реки. Увеличение фронта дельты происходит относительно быстро, но отдельные ветви не формируются. Волновое воздействие формирует из осадочного материала остроконечную форму, сортируя его так, чтобы образовались песчаные пляжи и замыкающие их косы. При более сильном эпизодическом действии волн очертания дельты становятся дольчатыми. Этот тип имеет дельта реки Нестос на севере Эгейского моря.



Рис. 1.18. Дельта реки Ахелус в западной Греции. Дельтовый материал образует причудливые очертания, формируя песчаные пляжи и перемещающиеся косы

Когда до берега доходят более сильные волны открытого моря дельта принимает тупоконечную форму. Осадочный материал, поставляемый рекой, быстро рассредоточивается волнами. На прибрежных участках, характеризующихся высокой волновой энергией дельты развиваются слабо. Такова дельта реки Пинейос, впадающей в СЗ часть Эгейского моря (рис. 1.19).

Морфология дельтовой равнины реки Ахеронтас на СЗ Греции представлена древними ложами и берегами реки, преобразованными в дугообразную форму. Эти криволинейные морфологические черты сформированы концентрически, следуя той же ориентации, которую имеет современный дугообразный пляж (рис. 1.20).



Рис. 19. Дельта реки Пинеиос в СЗ части Эгейского моря



Рис. 1.20. Морфология дельтовой равнины реки Ахеронтас на СЗ Греции представлена концентрическими древними руслами и берегами реки, имеющими полукруглую форму

Греческие ученые (Anagnostou et al, 2005 a) предлагают следующее, представляющееся нам разумным, объяснение механизмов формирования таких дельтовых равнин. С одной стороны, имеются криволинейные морфологические микро-гребни, которые представляют собой еще более древние, длинные и узкие косы, мигрирующие во вдольбереговом направлении в результате дифракционной динамики волн, а с другой стороны, близ них имеется речное ложе. Интенсивным речным течением длинные косы могут быть перерезаны возле устья реки (на юге), и может начаться процесс формирования новой узкой и длинной косы. Это происходило много раз в течение последних 5000 лет, начиная со стабилизации уровня моря в сегодняшнем положении, и привело к формированию дугообразных узких полос микро-гребней и микро-депрессий (древние ложа реки).

Дельты являются аккумулятивными образованиями, непрерывно меняющимися во времени. Стадии эволюции дельт могут быть выделены и прослежены. Пример изменений береговой линии в заливе Термаикос на СЗ Эгейского моря за последние 2500 лет приведен на рис. 1.21.

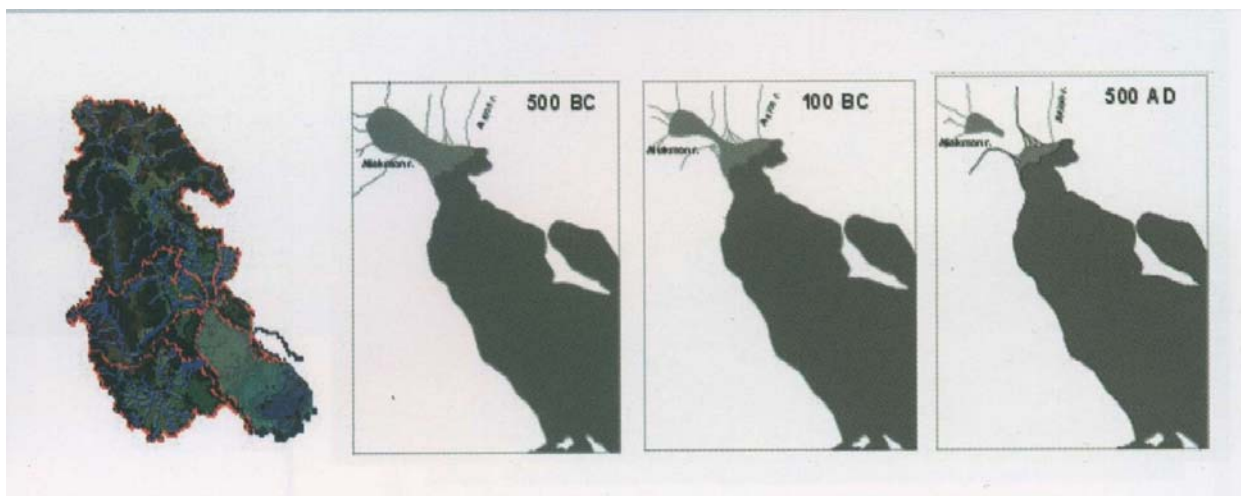


Рис. 1.21. Изменения береговой линии и эволюция за последние 2500 лет залива Термаикос на СЗ Эгейского моря

1.3. Проблемы берегозащиты и эрозии некоторых участков побережья Греции

В целом берега Греции подвержены эрозии в заметно меньшей степени, чем берега российских южных морей. Однако на ряде участков, особенно тех, где имеются сравнительно легко размываемые песчаные пляжи, эти проблемы стоят достаточно остро. Также как и для российских берегов актуальными оказываются и задачи защиты берега, береговых объектов и сохранения рекреационной ценности побережья. К такого рода участкам относится участок, расположенный в западной части залива Термаикос в СЗ

части Эгейского моря. Эта часть побережья характеризуется обширными песчаными пляжами длиной 15 - 20 км, которые были сформированы в результате взаимодействия выноса маленьких рек и притоков и доминирующего волнового воздействия ЮВ направления.

Проблемы развития этого участка затронуты в работе Анагностоу и др. (Anagnostou et al, 2005 b). Ими рассмотрены условия изменения береговой линии в результате строительства в 80-х годах прошлого века небольшого порта и показано, что отсутствие правильного учета береговых процессов имеет негативные последствия. Отрицательным последствием антропогенного строительства стала эрозия самой важной части берега этой области. В конце 80-ых годов и в начале 90-ых были предприняты меры по защите прибрежной области от эрозии. Были построены несколько бун с использованием в качестве строительного материала естественного камня (рис. 1.22).

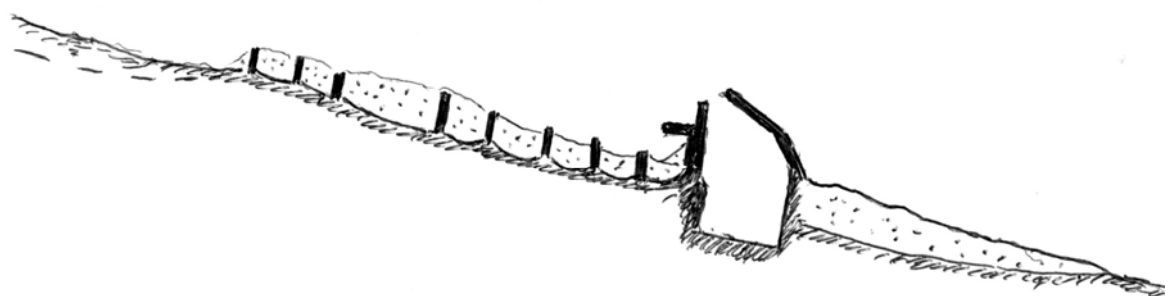


Рис. 1.22. Схема порта и берегозащиты с применением бун с каменным заполнением в заливе Термаикос. На схеме показаны накопления материала перед молом, в межбунном пространстве и размыв за берегозащитным комплексом

Эти сооружения остановили эрозию на межбунных участках, но не деградацию берегов. Продолжалась эрозия всех незащищенных участков береговой линии. С другой стороны, с южной стороны маленького порта накапливался песок. Мол порта отделил участок, страдающий от эрозии, от другой области, характеризующейся приростом берега. Подсчитанное количество накопленного осадка было больше чем 100.000 м^3 за 15 лет ($\sim 7.000 \text{ м}^3 / \text{год}$).

Таким образом, предпринимавшиеся защитные меры, оказались весьма дорогостоящими, но никакого удовлетворительного результата для стабилизации берега и сохранения природных ресурсов не принесли.

Этот пример подтвердил выводы анализа достаточно большого российского опыта берегозащиты, обобщенного в наших работах по проблемам берегозащиты южных морей России (Отчет о НИР по ФЦП «Мировой океан»). Можно высказать предположение, что и в рассматриваемом случае, как и в ряде подобных ситуаций на российском побережье Черного моря, наиболее эффективным решением было бы строительство портовых сооружений после тщательного изучения местной прибрежной динамики, детального моделирования взаимодействия сооружений с естественной средой и выбора оптимального варианта по итогам моделирования.

В данном случае представляется правильным промоделировать варианты с искусственной подпиткой пляжа или с байпасингом наносов и даже рассмотреть вопрос о целесообразности ликвидации бун.

1.4. Остров Родос

Образовавшийся в результате сейсмической деятельности в далеком прошлом, остров Родос является самым крупным островом из двух сотен островов Эгейского моря, известных под названием Додеканес (рис. 1.23). Он расположен в юго-восточной части Эгейского моря, у восточного края активной Эллинской дуги. Длина острова - 78 км, максимальная ширина – 38 км, а площадь его составляет 1400 км^2 . Протяженность береговой линии Родоса около 220 км, значительную часть ее составляют песчаные и галечные пляжи которые прерываются крутыми скалами.



Рис. 1.23. Карта-схема острова Родос

Геологическая и неотектоническая обстановка острова является тем фоном, на котором развиваются современные береговые процессы острова. Она достаточно хорошо описана в работах греческих специалистов и других ученых (Sakellariou et al, 2003;; Drakopoulos et al 1988; le Pichon & Angelier, 1979; Pirazzoli et al 1989). Согласно их результатам геодинамическая обстановка в этом районе характеризуется преимущественно нормальными сбросами по впадинам Страбо и Плайнай, которые очерчивают два тектонических элемента с почти горизонтальными подвижками между нижележащей Африканской плитой и вышележащей Эгейской (Европейской) плитой. Высокий рельеф острова Родос, многочисленные активные разломы и сбросовые зоны, деформация плейстоценовых и голоценовых отложений, вертикальные смещения береговых линий образуют профиль очень активного района с точки зрения неотектонической активности и сейсмичности. Общее ВЮВ понижение плейстоценовых морских террас и залегания плио-плейстоценовых отложений являются последствиями наклона острова. Дополнительные последствия – это асимметричное развитие дренажной системы и рельефа (морфологии) острова. В общем СЗ склоны круты, в то время как ЮВ склоны понижаются плавно. Голоценовая сбросовая активность привела к повторяющимся подъемам в сравнении с оседанием восточной и северной береговых линий острова.

Проблемы эрозии и защиты берегов являются актуальными для пляжевых участков берега. Как уже отмечалось, песчаные и галечные пляжи составляют значительную часть побережья. При этом пляжевые участки регулярно прерываются скальными участками и мысами, что по существу позволяет считать многие из них отдельными литодинамическими ячейками и рассматривать проблемы эрозии для отдельных ячеек. Это разделение довольно хорошо видно и на восточном, и на западном побережья острова.

На восточном побережье первая такая система простирается от Каллифеи до Ладико (рис. 1.24). В ее пределах несколько бухт с широкими песчаными пляжами (рис. 1.25), которые, по-видимому, испытывают лишь значимые сезонные изменения, оставаясь сравнительно стабильными, либо слабо изменяющимися в многолетнем разрезе.



Рис. 1.24. Участок побережья залива Каллифея. Хорошо естественным образом защищен и пляж пос. Ладико.



Рис. 1.25. Бухта Ладико

Следующую литодинамическую систему побережья представляет участок пос. Ладико-мыс Архангелос. Здесь также имеются широкие песчаные пляжи, в большей степени открытые штормовому воздействию, поэтому некоторые, например, пляж пос. Колимпия, (рис. 1.26) защищены молами, которые заодно образуют небольшие порты в основном для парусного флота. По-видимому, эти пляжи являются слабо эродирующими, но проблема их эрозии требует специального анализа.



Рис. 1.26. Участок побережья бухты Колимпия, защищенный каменнонасыпным молом

Следующая значительная система мыс Архангелос-мыс Эмильянос, внутри которой можно даже выделить отдельным элементом участок побережья Хараки с небольшим, отгороженным и защищенным скалами заливом (рис. 1.27).

Отдельную пограничную систему представляет собой заметно выступающий в море п-ов Линдос с целым набором небольших бухт, окруженных участками со скальными породами (рис. 1.28). Под защитой скал на Линдосе имеется небольшие, но достаточно широкие пляжи.



Рис. 1.27. Побережье Хараки.



Рис. 1.28.
Скалы и бухты
Линда,
в которых
видны
пляжевые
участки

Значительную часть сравнительно большой и открытой действию волн литодинамической системы Линдос-Прасониси занимает побережье Геннадийского залива также с достаточно широким пляжем (рис. 1.29).



Рис. 1.29. Побережье Геннадийского залива

При более тщательном изучении в системе Линдос-Прасониси можно было бы выделить ряд подсистем. По-видимому, здесь обмен наносов между подсистемами происходит более энергично, чем на обследованных северных участках.

На западном побережье значительную часть пляжей составляют уже галечные, хотя немало и песчаных пляжей. От г. Ялисос до мыса Коприа пляжи мало защищены от волнового воздействия, они не столь широки, заметны признаки вдольбереговых миграций материала (см. рис.1.30, 1.31).



Рис.1.30. Характерный участок побережья Ялисского залива



Рис. 1.31. Участки западного побережья с галечными пляжами

Здесь стоит отметить, что на острове существует практика изъятия песчаного и особенно галечного пляжевого материала на хозяйственные цели. Так в некоторых городках целые площади и улицы выложены изъятной из моря галькой (рис. 1.32).



Рис. 1.32. Улица и площадь, вымощенные пляжевой галькой

Следующей является литодинамическая система между мысами Коприа и Арменистис, по динамическим характеристикам сходная с предшествующей. Характерный участок системы показан на рис. 1.33. Она заканчивается мощным сальным образованием – мысами Арменистис (рис.1.34) и Строгилло.



Рис. 1.33. Участок системы м. Коприа - м. Арменитос

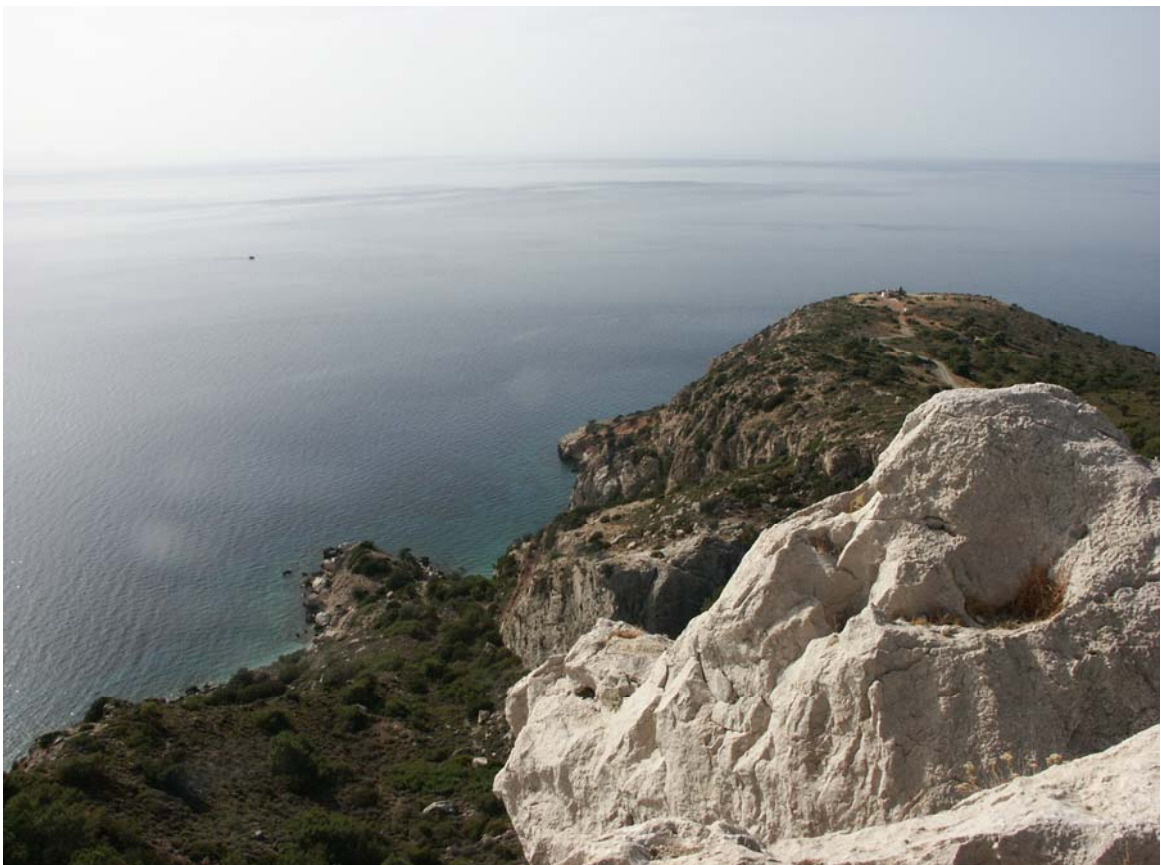


Рис. 1.34. Скалы мыса Арменитос

Далее почти до южной оконечности острова структура побережья сходна с таковой описанных выше открытых систем.

Особое место, как эродирующие объекты, подверженные сравнительно интенсивному волновому воздействию и Средиземного и Эгейского моря, занимают граничные участки Родоса, южный - остров Прасониси, соединенный с Родосом узким перешейком и северный мыс острова.

Стабильность берегов Прасониси, также как довольно узкого перешейка (см. рис. 1.35) требуют специального исследования и анализа, что выходит за рамки настоящей работы.



Рис. 1.35. Остров Прасониси: *а* - аэроснимок; *б* - вид с корня перешейка, соединяющего его с Родосом, справа Средиземное море, слева Эгейское.

И не менее остро эта проблема стоит для песчано-гравийного берега у северного мыса острова – мыса Миллз, по существу являющейся косой, сформировавшейся в результате вдольберегового перемещения пляжевого материала. По проблемам этого участка мы на основании работ (Sakellariou et al, 2003; Meulenkamp et al 1972; Lekkas et al 1993) и собственных наблюдений располагаем большим объемом информации.

Достаточно много свидетельств об активной тектонике этого района. Северная его часть плоская, в то время как южные части развивались на холмистом пейзаже района Монт Смита и области Родины. Плоская северная часть покрыта плио-плейстоценовыми глинистыми известняками Асгурской формации и голоценовыми аллювиальными и прибрежными отложениями. На южной холмистой части встречаются плио-плейстоценовые мергели и известняки Родосской формации.

Влияние юго-восточного наклона острова в Четвертичном периоде можно хорошо видеть по юго-восточному опусканию террас и залегания плио-плейстоценовых отложений и асимметричному распространению морфологических уклонов.

Несколько активных разломов пересекают район и наклоняются. Разломы СЗ погружения имеют нормальную природу и вызывают формирование крутых СЗ уклонов вдоль западной части района. В отличие от крутых СЗ склонов ландшафт восточного побережья плавно опускается. Опускающиеся с СЗ и С разломы имеют восточный наклон. Совокупный вертикальный сброс этих разломов уменьшается к востоку. Такая же конфигурация наблюдается далее в море. Морское дно западного мелкого шельфа и склона значительно более круто, чем морское дно к востоку от мыса.

Мыс Миллз имеет широкий песчано-галечный пляж, простирающийся вокруг него. Ширина пляжа может достигать нескольких десятков метров (рис. 1.36).



Рис. 1.36. Печано-галечный пляж, огибающий мыс Миллз, май 2006 г.

Однако ширина этой непрерывно меняющейся косы сезонно изменяется в зависимости от силы и направления доминирующих ветров. В случае очень сильных ветров ширина пляжа и толщина песчаных отложений уменьшается и обнажается плейстоценовое основание. Так в марте 1998 года очень сильные ветра (скорость 120

км/час) полностью снесли песчаные отложения пляжа с восточной стороны и вызвали серьезные разрушения здания аквариума и маяка, которые расположены в самой северной точке мыса.

Съемки положения береговой линии были проведены чуть позднее, в апреле 1988 г., а уже к сентябрю того же года коса выросла к северу на несколько десятков метров (рис. 1.37). Последующие съемки (1999 и 2002 гг.) показывают нарастание косы, но, по-видимому, сезонные изменения превышают зафиксированные при этом значения. Зимой преобладает ветер S-SE направления, что приводит к формированию песчаной косы, обращенной на запад. В летний период преобладают ветра СЗ-З направлений, что изменяет форму косы и образует новую – обращенную на восток.

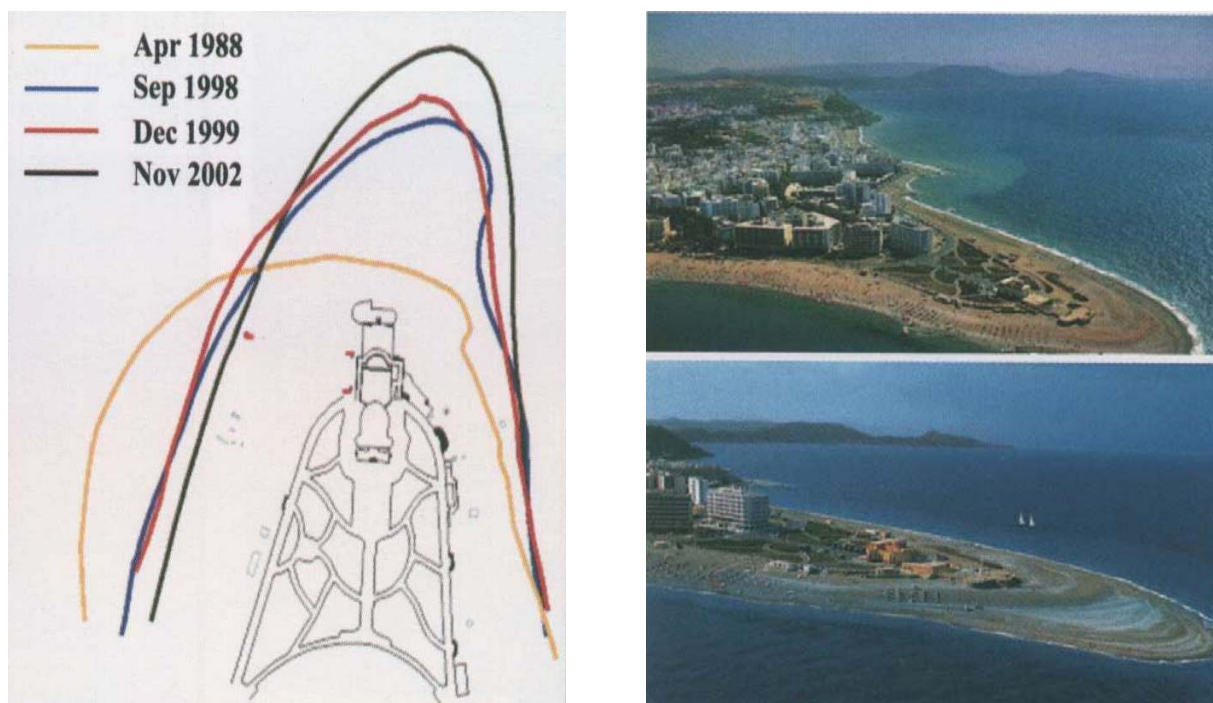


Рис. 1.37. Морфологические изменения береговой линии у мыса Миллз. На карте показаны изменения береговой линии в различные годы. Фотографии справа показывают типичное зимнее и летнее состояния.

В мае 2006 г. нами в ходе прибрежного эксперимента также были проведено обследование состояния этого пляжа, которое показало, что положение береговой линии примерно соответствует положению соответствующему 2002 г. на карте.

В заключение краткого обзора состояния берегов следует отметить, что проблемы эрозии и защиты греческих берегов сходны с таковыми побережий российских южных морей. Хотя для острова Родос они не стоят так остро как для многих черноморских участков. Тем не менее, эти проблемы и необходимость прогноза развития побережья

требуют более тщательного изучения, чем исследования, проводившиеся лишь геоморфологическими методами, позволившие делать лишь качественные выводы. На побережье не проводились наблюдения, позволяющие собрать данные для того, чтобы искать связи между береговыми процессами и характеристиками волнения, разрабатывать динамические модели, по которым можно строить количественный прогноз развития прибрежной зоны. Нет на побережье и специальных научных полигонов для постановки детальных комплексных экспериментов, подобных оборудованному специальной эстакадой прибрежно-морскому черноморскому полигону «Шкорпиловцы» (Болгария). Нет и береговых сооружений, которые могут быть приспособлены для таких экспериментов, подобных эстакаде в пос. Новомихайловский (ВДЦ «Орленок»), которая успешно использовалась нами для постановки детальных натуральных экспериментов (Отчет о НИР по ФЦП «Мировой океан»). А как показывает опыт работ на этих полигонах и итоги моделирования процессов динамики береговой зоны моря, именно современные и новые технологии измерений и моделирования являются той базой, на которой можно строить надежный прогноз развития прибрежной зоны.

Таким образом, можно сделать вывод, что для эффективного развития исследований по рассматриваемому направлению качественные натурные обследования необходимо дополнять разработкой количественных моделей, базирующихся на надежно обоснованных представлениях о механизмах транспорта наносов. Такие представления и надежные количественные связи должны быть получены из теоретического анализа и анализа данных экспериментов.

Как мы видим, натуральный эксперимент, позволяющий провести наблюдения ряда литодинамических процессов в существующих условиях, трудноосуществим. Что же касается лабораторных исследований, то особенно ценными они будут в масштабе соответствующем или близким натурному. Это связано с тем, что при ином масштабе моделирования оказывается невозможным одновременно соблюсти подобие гидродинамических и литодинамических процессов.

Оптимальным продолжением исследований оказывается моделирование процессов взаимодействия волн и наносов в Большом волновом канале Береговой исследовательской станции, подведомственной Университету г. Ганновера и Брауншвейгскому техническому университету (Германия). Условия Большого канала позволяют моделировать динамические процессы практически в натурном масштабе.

Описанию экспериментов, проведенных нами в этом канале, посвящен следующий раздел настоящего отчета.

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ГАННОВЕР’ 2006»

2.1. Задачи эксперимента

В соответствии с программой проекта и поставленными выше задачами с 8 по 24 июня 2006 г., проведен лабораторный эксперимент с условным названием «Ганновер’ 2006». Место проведения эксперимента: Германия, Ганновер, волновой лоток The Large Wave Channel (GWK) Береговой исследовательской станции Университета Ганновера и Технического университета Брауншвейга. Выбор лабораторной установки обусловлен тем, что волновой канал GWK позволяет моделировать динамические процессы береговой зоны практически без искажения масштаба, что чрезвычайно важно, так как при ином масштабе моделирования оказывается невозможным одновременно соблюсти подобие гидродинамических и литодинамических процессов.

Вместе с тем, эти работы явились первым шагом в развитии принятой программы российско-германского научно-технического сотрудничества по теме «Моделирование гидро - и литодинамических процессов в береговой зоне», проводимого Институтом океанологии им. П.П.Ширшова РАН и Береговой исследовательской станцией.

Цель эксперимента: выполнение лабораторных исследований по следующим задачам:

- продвижение в понимании механизмов формирования поля взвеси и потока наносов;
- развитие представлений о взаимосвязанных изменениях структуры взвесенесущего потока и микрорельефа дна, формируемого волновым потоком;
- изучение механизмов взвешивания наносов и оценка соотношения вкладов различных механизмов при воздействии волн;
- оценка роли крупномасштабной турбулентности в прибойной зоне в формировании потока наносов;
- разработка нового подхода для описания осредненного профиля концентрации взвешенных наносов, который будет учитывать влияние гидродинамических, морфологических и седиментологических параметров;
- разработка нового поколения моделей перемещения наносов штормовым волнением.

2.2. Приборы

При выполнении исследований использовались следующие приборы:

- оптические турбидиметры (4 шт.) для измерения концентрации взвешенных наносов (рис. 1, А);
- 3-х компонентный акустический измеритель скорости течения «Вектор», изготовленный фирмой «Nortek» (2 шт) (рис. 1, Б);

- 2-х компонентные электромагнитные датчики скорости течения «Stromungssensor Typ “S”» фирмы «Norddeutsche Seekabelwerke» (8 шт) (рис. 1, В);
- струнные волнографы (25 шт) (рис. 1, Г);
- наносонакопители (рис. 1, Д);
- видеокамера (рис. 1, Е) и фотоаппаратура.

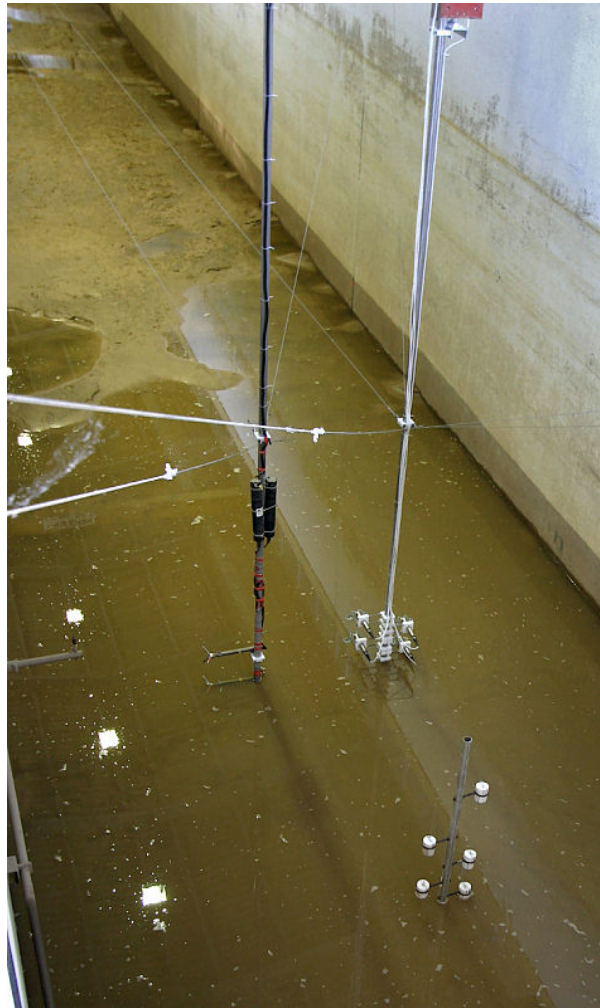
Измерительные приборы, принадлежащие германской стороне, устанавливались на штатных конструкциях, расположенных по определенной схеме вдоль лотка. В качестве носителей турбидиметров и измерителей «Вектор» использованы штанги (рис. 2.1), разработанные и изготовленные специально для этого эксперимента. Наносонакопители устанавливались на отдельной штанге, замытой в дно (рис. 2.2).

Получаемые данные вводились в персональный компьютера через параллельный 80-и каналный аналого-цифровой преобразователь с частотой 40 Гц. Разрядность каждого канала составляла 15 бит. Одновременно вводилась и записывалась информация о 71-м параметре. Информация по каждому параметру записывалась в отдельный файл. Т.о., после каждого цикла измерения на диск записывались 71 файл с измеренными характеристиками. Режим параллельной (одновременной) записи обеспечивал жесткую синхронизацию всех измеряемых параметров. Фото ВЦ и АЦП с параллельным вводом показаны на рис. 2.3.

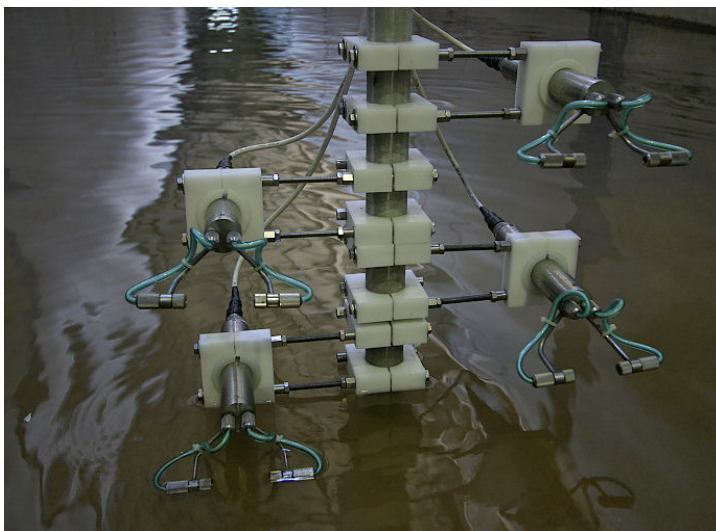
Для согласования выходных информационных сигналов турбидиметров с входными параметрами 80-канального АЦП, используемого штатно в лотке, были сделаны специальные согласующие устройства и установлены разъемы в бортовом блоке турбидиметров. Соединение бортового блока с АЦП осуществлялось с помощью коаксиальных кабелей, закупленных в Германии специально для этой цели. На рис. 2.4 показан бортовой блок обработки сигналов с турбидиметров (А) и фрагменты соединительных коаксиальных кабелей с промежуточными разъемами (Б). Через открытые входы промежуточных разъемов осуществлялся экспресс-контроль выходных сигналов в процессе измерений.



Рис. 2.1. Основное оборудование, использованное во время эксперимента «Ганновер’ 2006»: турбидиметр (А); «Вектор» (Б); 2-х компонентный электромагнитный датчик скорости течения (В); струнные волнографы (Г); наносонакопители (Д); видеочамера (Е).



А



Б



В

Рис. 2.2. Носители, с установленными на них турбидиметрами, «Векторами» и наносонакопителями (А). Взаимное расположение турбидиметров (Б) и «Векторов» (В) на штангах.



Рис. 2.3. Фотография вычислительного центра сбора информации с 80-и канальным АЦП параллельного ввода.



А



Б

Рис. 4. Бортовой блок обработки сигналов с турбидиметров (А), фрагменты соединительных кабелей с промежуточными разъемами (Б).

2.3. Калибровки приборов

Стандартные приборы, использованные в процессе эксперимента, обеспечивались тарировочными характеристиками от компаний-производителей. Турбидиметры были откалиброваны в Южном отделении Института океанологии РАН за месяц до проведения эксперимента по образцам песка, доставленного из лотка в начале 2006 года.

Лабораторные работы с турбидиметрами

А) Проверка токов турбидиметров

Проверки производились в лаборатории Литодинамики береговой зоны моря. Основная цель проверки: замер «темнового» и максимального токов в прозрачной пресной воде. Результаты проверки сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Лабораторные показания выходных токов турбидиметров.

№ п/п	№ турбидиметра	Ток 0, мА	max ток, мА
1	1	0,27	20
2	2	0,02	20
3	3	0,02	20
4	4	0	20
5	5	0,07	20,5
6	6	0,05	20
7	7	0,01	20

Выходные токи погружаемого блока замерялись на входе бортового преобразователя тока в напряжение.

Б) Тарировки по «0» и максимальным показаниям в воде. Лабораторная тарировка по композиционному песку.

Тарировки производились в лаборатории, в апреле 2006 года, с использованием пресной воды.

Затем, 13 июня 2006 года, тарировки по «0» и максимальным показаниям произведены в воде лотка.

По результатам лабораторных тестирований на эксперимент «Ганновер' 06» были выбраны турбидиметры №№ 1, 2, 3, 4, 6. Турбидиметры 1-4 использовались для проведения измерений. Турбидиметр 6 был взят как резервный.

Результаты тарировок по «0» и максимальным показаниям сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2. Результаты тарировок турбидиметров по «0» и максимальным показаниям

Тарировка в пресной воде, 28.04.2006			В воде лотка, 13.06.2006	
№ турбидиметра	Код 0	Код max, N ₀	Сигн. 0, Вольт	Сигн. V _{max} , Вольт
1	2047	3570	0	4.15
2	2048	3650	0	3.83
3	2047	3300	0	3.12
4	2047	3420	0	3.27
5	2047	3640	-	-
6	2047	3690	-	-
7	2047	3320	-	-

Результаты лабораторной тарировки по композиционному песку в виде графика приведены на рис. 2.5.

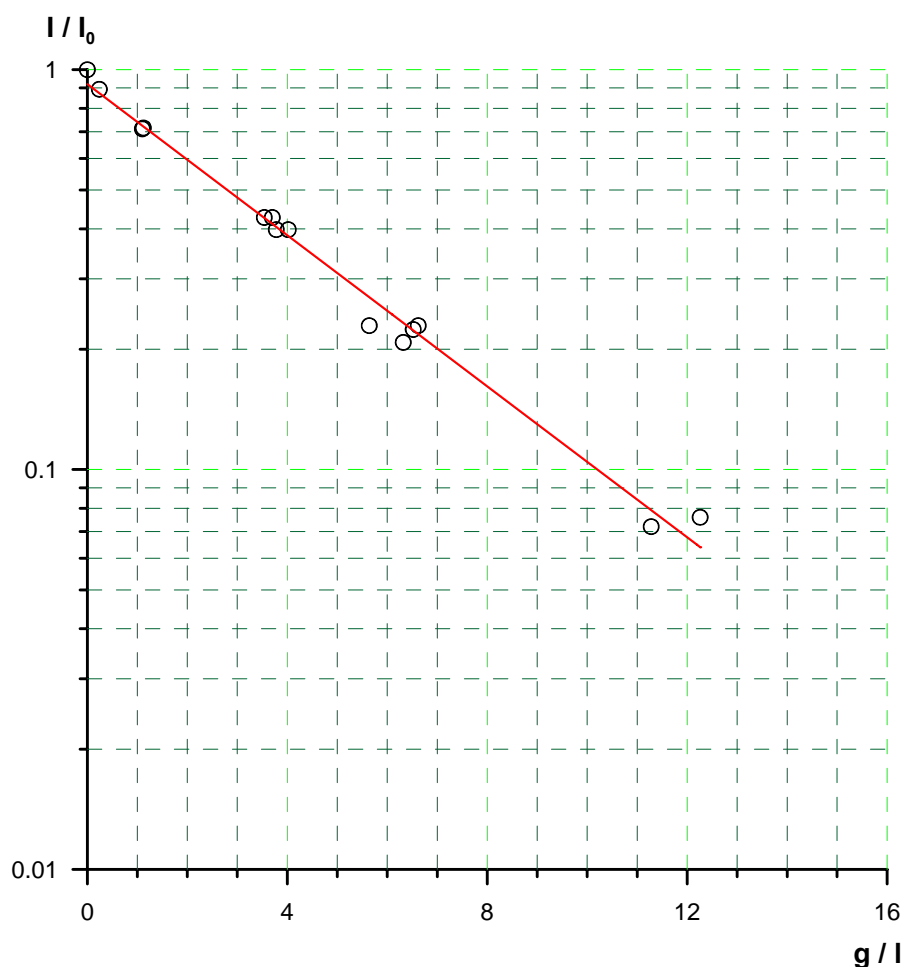


Рис.2.5. График зависимости показаний турбидиметра от концентрации взвеси. Тарировка произведена по композиционному песку.

Математическая зависимость измеряемой концентрации от текущих показаний конкретного измерительного устройства имеет вид.

$$C = -4.598844426 * \ln((N - 2000) / (N_0 - 2000))$$

Здесь:

C – концентрация в г/л;

N – текущий код;

N₀ – «код max» из предыдущей таблицы для воды полигона.

Статистические данные расчетов:

$$\text{Equation } \ln(Y) = -0.2174459293 * X$$

$$x = -4,5988444263785075143276089832048 * \ln(N/N_0)$$

$$\text{Alternate } Y = \exp(-0.2174459293 * X) * 0.9195032585$$

Number of data points used = 14

Average X = 4.72429

Average ln(Y) = -1.1112

Residual sum of squares = 0.0915459

Regression sum of squares = 8.62252

Coef of determination, R-squared = 0.989494

Residual mean square, sigma-hat-sq'd = 0.00762883

Для АЦП Ганноверского лотка, на выходе которого сигнал существует в Вольтах, реальная концентрация (C) в граммах на литр рассчитывалась по формуле:

$$C = -4.598844426 * \ln(V / V_{\max}),$$

где V – текущие показания турбидиметров, в Вольтах;

V_{max} – напряжение на выходе конкретного турбидиметра для "чистой" воды места (точки), где проводится эксперимент, в Вольтах. Для более детальной оценки абсолютного значения концентрации таким числом может служить показание турбидиметра через некоторое время после прекращения процесса волнения;

-4.598844426 – тарифовочный коэффициент.

Результаты гранулометрического анализа ситовым методом проб песка, привезенных из лотка, даны в таблице 3 и на рис.2.6.

Таблица 2.3. Результаты ситового анализа проб песка из Ганноверского лотка

Фракция, мм	Среднее значение фракции, мм	Проба №1, %	Проба №2, %
> 0,8	0,9	1,77	2,58
0,8 – 0,63	0,715	2,37	3,32
0,63 – 0,5	0,565	6,37	7,4
0,5 – 0,4	0,45	9,74	10,93
0,4 – 0,315	0,358	13,84	13,81
0,315 – 0,25	0,28	25,93	26,34
0,25 – 0,2	0,225	16,06	14,46
0,2 – 0,16	0,18	10,05	8,48
0,16 – 0,125	0,142	7,33	7,08
0,125 – 0,1	0,112	4,10	3,75
0,1 – 0,08	0,09	1,78	1,32
0,08 – 0,063	0,072	0,39	0,28
<0,063	0,056	0,27	0,25
Средний размер, мм		0.16	0.22

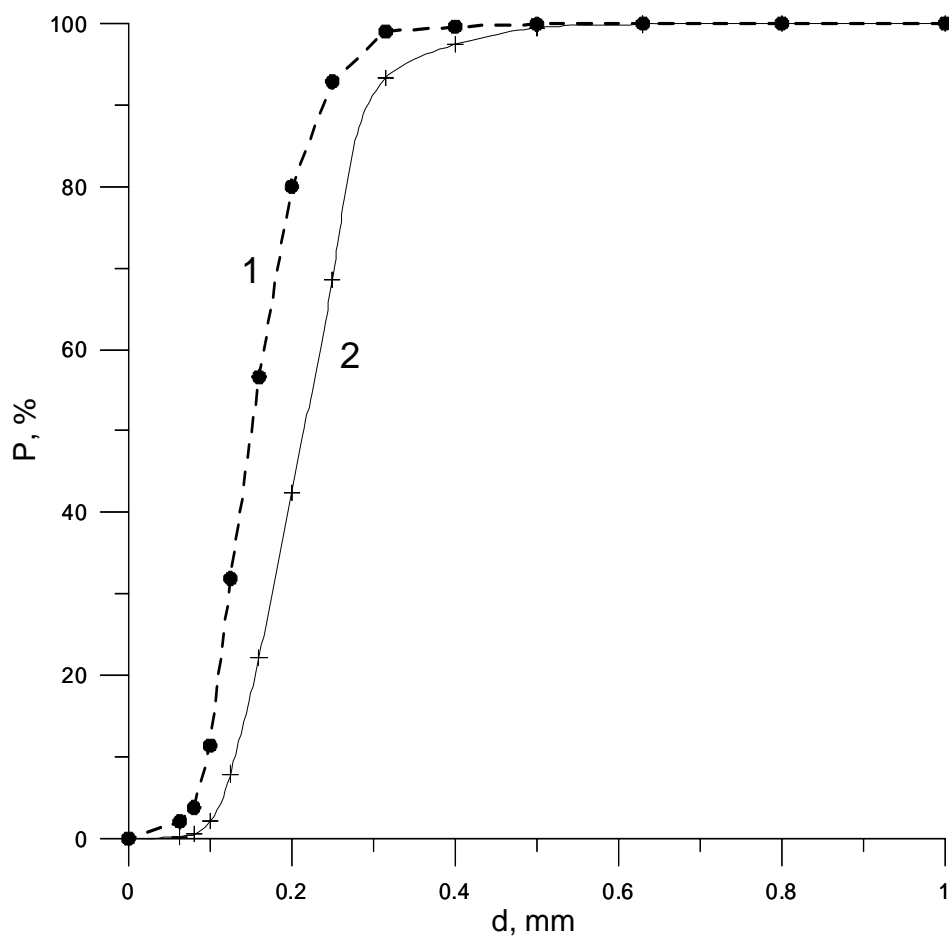


Рис. 2.6. График композиционного состава песка из Ганноверского лотка.

2.4. Первичные данные

Как уже говорилось ранее, после цикла измерений полученные данные с каждого датчика записывались в отдельный файл. Всего файлов за один цикл измерения – 71. Данные в файлах присутствуют в бинарной форме. Частота опроса каждого датчика – 40 Гц.

Для дальнейшей работы с данными их нужно последовательно преобразовать: *в код ASCII – Вольты – реальные значения измеренного параметра* (в соответствии с тарировочными коэффициентами). Далее, на примере данных с турбидиметров, приведена блок-схема алгоритма преобразования бинарного кода в реальные значения концентрации взвеси (рис. 2.7).

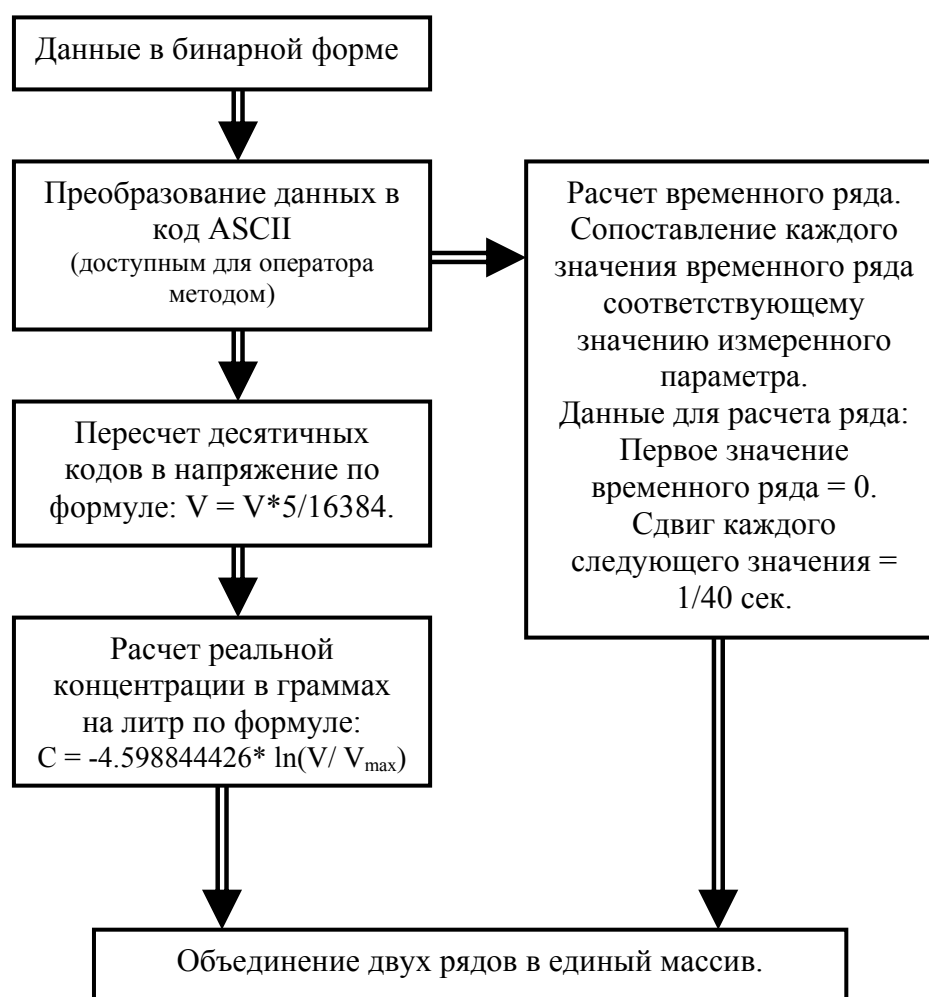


Рис. 2.7. Алгоритм предварительной подготовки первичных данных для последующего анализа исследуемых процессов (на примере данных с турбидиметров).

Аналогичная схема обработки сохраняется и для других датчиков. Отличие только в том, что пересчет в реальные значения измеряемых параметров осуществляется с помощью калибровочных коэффициентов. Калибровочные коэффициенты, распределение датчиков по

каналам АЦП, схема расположения вдоль лотка, а также другая техническая информация относительно первичных измерителей приведены на рис. 2.8 в табличном виде.

Для каждого цикла измерений файл с первичными данными имеет формат имени: 12060601.G01 - 12060601.G71. Здесь левая часть имени – дата проведения измерения и номер опыта в текущий день. Правая часть имени – номер канала АЦП, через который данные введены в компьютер.

К 71 одному файлу с первичными данными добавлен файл с расширением GTX. В этот файл сведены статистические параметры по каждому каналу для конкретного опыта. Данные файла имеют формат ASCII. Пример содержания такого файла дан ниже.

Пример содержания файла 12060601.GTX:

```
Messung am GROSSEN WELLENKANAL vom 12.06.2006      PRESTON 16Bit A/D * S&H
Test Shirshof-Institut, Schwarzes Meer, Russland
Testmessung ohne Wasser
Versuchsnummer      1
Wasserstand         [m]          0.000
Wellenhoehoe       [m]          0.000
Wellenperiode       [s]          0.000
Anzahl Kanaele      71
Frequenz            [Hz]         40.000000000
Abtastperiode       [s]          0.025000000
Kanal 1  Min: 0.004 Max: 0.014 (M+M)/2: 0.0087 Zero: 0.013 Volt
Range 32768 N/Min/Max/Mean/Zero      800  12  45  41.24  41.52
Channel 01 : IGB PWD-Dose Nr.75803 (1.5m Hoehe)
X-POS/Y-POS/CAL/DIM  109.72  1.50  2.258845  [ bar ]

Kanal 2  Min: 0.004 Max: 0.013 (M+M)/2: 0.0085 Zero: 0.013 Volt
Range 32768 N/Min/Max/Mean/Zero      800  12  44  40.68  40.98
Channel 02 : IGB PWD-Dose Nr.69889 (1.5m Hoehe)
X-POS/Y-POS/CAL/DIM  109.72  1.50  33.51682  [ bar ]

Kanal 69  Min: 0.994 Max: 1.008 (M+M)/2: 1.0008 Zero: 1.001 Volt
Range 32768 N/Min/Max/Mean/Zero      800  3256  3303  3280.33  3280.99
Channel 69 : FZK PWD-Dose Nr.1981154 (1.0bar)
X-POS/Y-POS/CAL/DIM  109.72  1.00  0.0306488  [ bar ]
Kanal 70  Min: 1.015 Max: 1.032 (M+M)/2: 1.0236 Zero: 1.023 Volt
Range 32768 N/Min/Max/Mean/Zero      800  3326  3382  3351.15  3351.98
Channel 70 : FZK PWD-Dose Nr.1981153 (1.0bar)
X-POS/Y-POS/CAL/DIM  109.72  1.00  0.0307259  [ bar ]
Kanal 71  Min: 1.459 Max: 1.477 (M+M)/2: 1.4680 Zero: 1.468 Volt
Range 32768 N/Min/Max/Mean/Zero      800  4782  4839  4808.59  4808.95
Kanal 71  Min: 1.459 Max: 1.477 (M+M)/2: 1.4680 Zero: 1.468 Volt
Range 32768 N/Min/Max/Mean/Zero      800  4782  4839  4808.59  4808.95
Channel 71 : FZK PWD-Dose Nr.1981135 (1.0bar)
X-POS/Y-POS/CAL/DIM  109.72  0.50  0.0309440  [ bar ]
Anzahl der Messwerte pro Kanal      800
Messdauer [s]                       20.000
```

Kanalen Nr	Pegel bzw. Sonde Nr	Position		Eichungswerte		CAL
		X [m]	Y [m]	10Volt / 32768Digit = 0.30517 [Volt/Digit]		
1	IGB Porenwasserdruck-Dose Nr 75803	1m vor Pfahl	1.50	0 ~ 2bar = 0 ~ 270 2mV 0 ~ 74.02bar = 0 ~ 10V 74.02/10=7.402bar/V 7.402*0.30517=2.258845		2.258845
2	IGB Porenwasserdruck-Dose Nr 69889	1m vor Pfahl	1.50	0~20bar=0.3~182.1mV 0 ~ 1098.3bar = 0.016 ~10V 1098.3/10=109.83bar/V 109.83*0.30517=33.51682		33.51682
3	IGB Porenwasserdruck-Dose Nr 963	2m vor Pfahl	1.50			
4	IGB Porenwasserdruck-Dose Nr 69890	2m vor Pfahl	1.50	0~20bar=0.2~189.5mV 0 ~ 1055.41bar = 0.01 ~ 10V 1055.41/10=105.541bar/V 105.541*0.30517= 32.20792		32.20792
5	IGB Porenwasserdruck-Dose Nr 75804	1m vor Pfahl	1.00	0~4bar=2.2~788.2mV 0 ~ 50.75bar = 0.028 ~ 10V 50.75/10=5.075bar/V 5.075*0.30517=1.548738		1.548738
6	IGB Porenwasserdruck-Dose Nr 69903	1m vor Pfahl	1.00	0~20bar=0.5~235.4mV 0 ~ 849.62bar = 0.021 ~ 10V 849.62/10=84.962bar/V 84.962*0.30517=25.927853		25.92785
7	IGB Spaten PWD 013683	2m vor Pfahl	1.00			
8	IGB Spaten Erddruck 013682	2m vor Pfahl	1.00			
9	WP 1	50,1	0			0,2706
10	WP 2	52,2	0			0,2614
11	WP 3	55,9	0			0,2577
12	WP 4	61,3	0			0,2602
13	WP 5	84,87	0,888			0,2607
14	WP 6	90,25	1,158			0,2512
15	WP 7	97,3	1,5			0,2691
16	WP 8	102,09	1,5			0,2558
17	WP 9	106,64	1,5			0,2724
18	WP 10	111,85	1,5			0,2856
19	WP 11	118	1,5			0,268
20	WP 12	126,22	1,5			0,2704
21	WP 13	140	1,5			0,2595
22	WP 14	162,4	1,5			0,2633
23	WP 15	180	1,5			0,2565
24	WP 16	199,12	2,456			0,2603
25	WP 17	208	2,9			0,2649
26	WP 18	216	3,3			0,253
27	WP 19	224	3,7			0,2492
28	WP 20	228	0			0,2445
29	WP 21	232	4,1			0,256
30	WP 22	236	0			0,265
31	WP 23	240	4,39			0,2945
32	WP 24	243,97	4,6			0,3049
33	WP 25	248,03	4,7			0,3404
34	ST-90 : X	111,00	3,00			0,35966
35	NSW 2 (88310): X (mit Filter)	111,00	2,10	0,30517*1,143		0,34877
36	Y (mit Filter)	111,00	2,10	0,30517*1,167		0,35626
37	NSW 3 (88308): X (mit Filter)	111,00	2,70	0,30517*1,105		0,33725
38	Y (mit Filter)	111,00	2,70	0,30517*1,125		0,3432
39	NSW 4 (88309): X (mit Filter)	111,00	3,30	0,30517*1,0260		0,31316
40	Y (mit Filter)	111,00	3,30	0,30517*1,0510		0,3207
41	NSW 1 (87823): X (mit Filter)	111,00	4,00	0,30517*1,109	damalige NSW Bessbühne	0,33843
42	Y (mit Filter)	111,00	4,00	0,30517*1,113		0,33973
43	NSW 2 (88310): X (ohne Filter)	111,00	2,10	0,30517*1,143		0,34877
44	Y (ohne Filter)	111,00	2,10	0,30517*1,167		0,35626
45	NSW 3 (88308): X (ohne Filter)	111,00	2,70	0,30517*1,105		0,33725
46	Y (ohne Filter)	111,00	2,70	0,30517*1,125		0,3432
47	NSW 4 (88309): X (ohne Filter)	111,00	3,30	0,30517*1,0260		0,31316
48	Y (ohne Filter)	111,00	3,30	0,30517*1,0510		0,3207
49	NSW 1 (87823): X (ohne Filter)	111,00	4,00	0,30517*1,109	damalige NSW Bessbühne	0,33843
50	Y (ohne Filter)	111,00	4,00	0,30517*1,113		0,33973
51	Vector 1	x	2,1			
52	Vector 1	y	2,1			
53	Vector 1	z	2,1	Nortek: 4340 (ab 01.06.06: 4334)		
54	Vector 2	x	2,4			
55	Vector 2	y	2,4			
56	Vector 2	z	2,4	Nortek: 4336		
57	Turbidimeter 1	7 cm	140			
58	Turbidimeter 2	15 cm				
59	Turbidimeter 3	25 cm				
60	Turbidimeter 4	40 cm				
61						
62						
63						
64						
65						
66	FZK Porenwasserdruck-Dose: Nr.127157 (0,7bar)	1m vor Pfahl	1,80	0 ~ 0,7bar = 0 ~ 10 Volt: 1/14,51*0.30517=0.0210317		0.0210317
67	FZK Porenwasserdruck-Dose: Nr. 2008012 (1.0bar)	2m vor Pfahl	1,80	0 ~ 1,0bar = 0 ~ 10 Volt: 1/9,853*0.30517=0.0309723		0.0309723
68	FZK Porenwasserdruck-Dose: Nr. 1981156 (1.0bar)	1m vor Pfahl	1,50	0 ~ 1,0bar = 0 ~ 10 Volt: 1/9,92*0.30517=0.0307631		0.0307631
69	FZK Porenwasserdruck-Dose: Nr. 1981154 (1.0bar)	1m vor Pfahl	1,00	0 ~ 1,0bar = 0 ~ 10 Volt: 1/9,957*0.30517=0.03064879		0.0306488
70	FZK Porenwasserdruck-Dose: Nr. 1981153 (1.0bar)	1m vor Pfahl	1,00	0 ~ 1,0bar = 0 ~ 10 Volt: 1/9,932*0.30517=0.03072594		0.0307259
71	FZK Porenwasserdruck-Dose: Nr. 1981135 (1.0bar)	1m vor Pfahl	0,50	0 ~ 1,0bar = 0 ~ 10 Volt: 1/9,862*0.30517=0.03094403		0.030944
72						
73						
74						
75						
76						
77						
78						
79						

Рис. 2.8. Техническая информация по первичным измерителям для эксперимента «Ганновер’ 06»: наименование измерителя; калибровочные коэффициенты, распределение датчиков по каналам АЦП, схема расположения вдоль лотка и пр.

2.5. Волновой канал

Волновой канал находится в Ганновере. Лоток принадлежит Береговой исследовательской станции, подведомственной совместно Университету Ганновера и Техническому университету Брауншвейга. Лоток имеет длину 300 метров и глубину канала от бортиков до дна – 7 метров. На дно лотка засыпан песок. Толщина насыпки меняется от одного края лотка до другого от 0 до 5,5 метров (может меняться в зависимости от программы конкретного эксперимента). Лоток заполняется пресной водой из проходящего рядом канала. Предварительно вода заливается в находящийся по соседству искусственный крытый водоем, в котором отстаивается и хранится достаточно длительное время. Сброс воды из лотка и закачка в лоток осуществляются из этого хранилища. Время заполнения лотка и сброса воды из него составляет около 10 часов.

С глубоководной стороны лотка находится волнопродуктор, управляемый программой электронно-вычислительной машины. Программа настраивается под задачи проводимых исследований. Мелководная часть лотка имеет профиль, способствующий гашению волны.

На рис. 2.9 показано фото лотка (вид со стороны волнопродуктора), на рис. 2.10 – волнопродуктор, на рис. 2.11 – рифели мелководной части лотка после сброса воды, на рис. 2.12 – профиль дна лотка и схема установки волнографов.

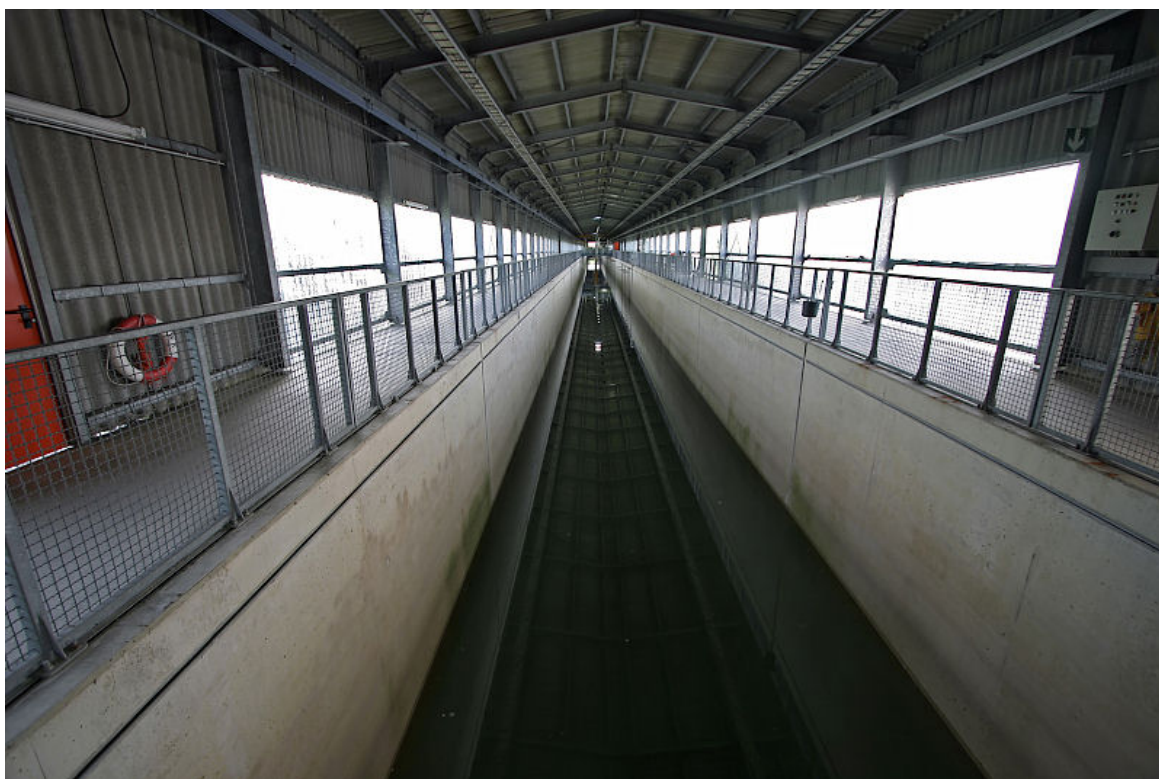


Рис.2.9. Волновой лоток. Вид со стороны волнопродуктора.



Рис. 2.10. Волнопродуктор, надводная часть.



Рис. 2.11. Вид на образовавшиеся рифели в мелководной части лотка после сброса воды.

Структура Ганноверского лотка и места установки волнографов во время эксперимента "Ганновер' 06"

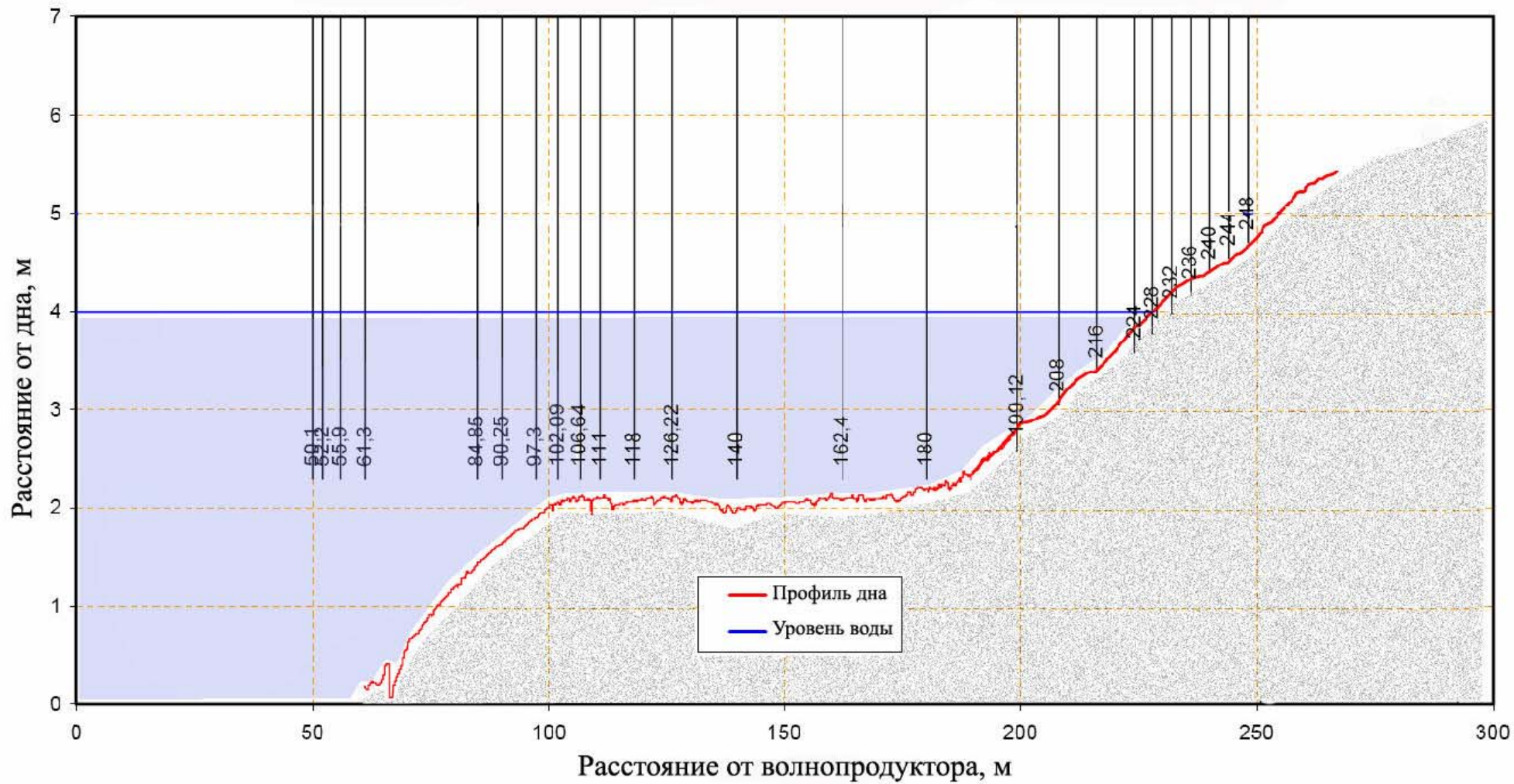


Рис. 2.12. Профиль дна лотка и схема установки волнографов.

2.6. Программа эксперимента

Программа эксперимента состояла из двух основных частей:

- исследования динамических процессов для спектров волнения, характерных для Черного моря;
 - исследования динамических процессов для модельного ряда спектров волнения, в котором последовательно менялись период и крутизна волн.
- Режимы волнения задавались с помощью программы, управляющей работой волнопродуктора.

2.6.1. Режимы волнения, характерные для Черного моря

В подразделах, описывающих задаваемые режимы волнения, приведены только наименования и характеристики режимов, а также названия файлов, в которые осуществлены соответствующие измерениям записи.

13.06.06

Опыт 1. Начало опыта 9-36 по местному времени. Длина записи 12 мин. Задана монохроматическая волна $H_{sig} = 0.6$ м, $T = 5$ с. Изначально волны заданы в виде кноидальной волны. Обрушение на пляже P1 208 м всегда. Имена файлов 13060601.G01-G71 и 13060601.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 2. Начало опыта 10-45 по местному времени. Длина записи 12 мин. Задана бихроматическая волна $H_{sig} = 0.6$ м, $T = 5$ с. Изначально волны заданы в виде суммы 2 кноидальных волн. Вторичные волны видны на 207 м. Обрушение максимальных волн P1 231 м. Имена файлов 13060602.G01-G71 и 13060602.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 3. Начало опыта 11-27 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 0.6$ м, $T = 5$ с. (Волна приближена к реальной по хронограмме эксперимента «Новомихайловка 2003», серия г02). Обрушение Sp-P1 210-230 м. Имена файлов 13060603.G01-G71 и 13060603.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 4. Начало опыта 12-30 по местному времени. Длина записи 12 мин. Задана монохроматическая волна $H_{sig} = 1$ м, $T = 5$ с. Изначально волны заданы в виде кноидальной волны. Обрушение на пляже P1 207 м всегда. Имена файлов 13060604.G01-G71 и 13060604.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 5. Начало опыта 13-45 по местному времени. Длина записи 60 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1$ м, $T = 5$ с. (Волна приближена к реальной по хронограмме

эксперимента «Новомихайловка 2003», серия r02). Обрушение иногда Sp 120 м, потом бор до 140-150 м. Маленькие волны обрушаются Sp, а большие Pl на 205 метрах. Имена файлов 13060605.G01-G71 и 13060605.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 6. Начало опыта 14-47 по местному времени. Длина записи 12 мин. Задана бихроматическая волна $H_{sig} = 1$ м, $T = 5$ с. Изначально волны заданы в виде волны Стокса. Вторичные волны видны на 207 м. Обрушение максимальных волн Pl 204 м, маленькие там же Sp. Имена файлов 13060606.G01-G71 и 13060606.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 7. Начало опыта 15-20 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 4.35$ с. (Волна приближена к реальной по хронограмме эксперимента «Новомихайловка 2003», серия r02). Обрушение иногда Sp 120 м, потом бор до 140-150 м. Маленькие волны обрушаются Sp, а большие Pl на 202 метрах. Далее бор до уреза. Имена файлов 13060607.G01-G71 и 13060607.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 8. Начало опыта 16-15 по местному времени. Длина записи 12 мин. Задана бихроматическая волна $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 4.2$ с. Изначально волны заданы в виде волны Стокса. Обрушение волн Sp-Pl от 202 до 218 м, в зависимости от величины. Маленькие там же, Sp. Имена файлов 13060608.G01-G71 и 13060608.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 9. Начало опыта 16-50 по местному времени. Длина записи 12 мин. Задана монохроматическая волна $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 5$ с. Изначально волны заданы в виде волны Стокса. Обрушение на пляже Pl 205 м всегда. Имена файлов 13060609.G01-G71 и 13060609.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

За первый день эксперимента были выполнены измерения по 9 задачам исследований. Всего за 1-й день записано 639 файлов с измеренными параметрами и 9 файлов со статистическими параметрами измерений по каждому опыту.

14.06.06

Опыт 1. Начало опыта 9-27 по местному времени. Длина записи 45 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1.25$ м, $T = 4.5$ с. (Волна приближена к реальной по хронограмме эксперимента «Новомихайловка 2003», серия r011). Обрушение иногда Sp-Pl 130-140 м, потом бор до 180 м. Иногда вторичные волны разрушаются на 180 м, иногда Sp

на 180 м. РІ на 205-206 м. Имена файлов 14060601.G01-G71 и 14060601.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 2. Начало опыта 11-00 по местному времени. Длина записи 45 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1.1$ м, $T = 8.19$ с. Имена файлов 14060602.G01-G71 и 14060602.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Начиная с этого опыта ведется киносъемка. В кинокамере выставлено зимнее время. Т.е., на час меньше реального.

Опыт 3. Начало опыта 12-00 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 8.19$ с. Имена файлов 14060603.G01-G71 и 14060603.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 4. Начало опыта 14-36 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1.2$ м, $T = 8.19$ с. Через точку 140 м (где установлены турбидиметры и измерители «Вектор») проходит ~ 45% неразрушенных волн и 55% в процессе разрушения. Опрокидывание по типу plunging начинается за 25-40 м до отметки 140 м. Имена файлов 14060604.G01-G71 и 14060604.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 5. Начало опыта 15-33 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 0.8$ м, $T = 8.19$ с. Имена файлов 14060605.G01-G71 и 14060605.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

За второй день эксперимента были выполнены измерения по 5 задачам исследований. Всего за 2-й день записано 355 файлов с измеренными параметрами и 5 файлов со статистическими параметрами измерений по каждому опыту.

15.06.06

Опыт 1. Начало опыта 8-45 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1.2$ м, $T = 6.92$ с. Через точку 140 м (где установлены турбидиметры и измерители «Вектор») проходит ~ 30-35% неразрушенных волн и 65-70% - разрушающимися. Процесс разрушения начинается, примерно, за 30 м до отметки 140 м. Волны доходят в разной стадии разрушения. Обрушение иногда Sp-120-150 м, РІ 100-110 м, потом бор до 150-170 м. Иногда необрушенные РІ на 205-207 м. Имена файлов 15060601.G01-G71 и 15060601.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 2. Начало опыта 9-50 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1.1$ м, $T = 6.92$ с. Обрушение иногда Sp-110-120 м, Pl 110 м, потом бор до 160 м. Часто – необрушенные. Имена файлов 15060602.G01-G71 и 15060602.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 3. Начало опыта 10-53 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 6.92$ с. Обрушение иногда Sp-120-130 м, редко Sp-Pl 110 м, потом бор до 160 м. Большие волны на грани обрушения на 140 м. Pl 205, 210, 212 м. Имена файлов 15060603.G01-G71 и 15060603.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 4. Начало опыта 11-58 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 6.92$ с. На 100-140 обрушения нет, один раз случился Sp-Pl на 140 м и один раз Pl на 110 м. Имена файлов 15060604.G01-G71 и 15060604.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 5. Начало опыта 13-26 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 0.8$ м, $T = 6.92$ с. Обрушения нет, кроме как на 205 м Pl. Имена файлов 15060605.G01-G71 и 15060605.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 6. Начало опыта 14-23 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 4.35$ с. (Волна приближена к реальной по хронограмме эксперимента «Новомихайловка 2003», серия r02). Обрушение иногда Sp 110 м, потом бор до 140-150 м. Имена файлов 15060606.G01-G71 и 15060606.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 7. Начало опыта 15-25 по местному времени. Длина записи 40 мин. Задана нерегулярная волна $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 4.35$ с. (Волна приближена к реальной по хронограмме эксперимента «Новомихайловка 2003», серия r02). Обрушение Sp 110, 130, 140 м; Pl 100-110, бор до 140 м. Имена файлов 15060607.G01-G71 и 15060607.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

За третий день эксперимента были выполнены измерения по 7 задачам исследований. Всего за 3-й день записано 497 файлов с измеренными параметрами и 7 файлов со статистическими параметрами измерений по каждому опыту.

Статистика исследований по режимам волнения, реально присутствующим в природе:

- количество исследованных режимов – 21;
- количество записанных файлов с данными – 1491;
- количество файлов со статическими параметрами измерений – 21.

2.6.2. Режимы волнения с модельным рядом спектров

Список режимов:

19 июня 2006	20 июня 2006	21 июня 2006
S 1045110	S 2545110	S 6045110
S 1045100	S 2545090	S 6045090
S 1045090	S 3345110	S 9945110
S 1545110	S 3345090	S 9945100
S 1545100	S 3345100	S 9945090
S 1545090	S 6045100	
S 2545100		

Все режимы с одинаковой гамма спектра получены масштабированием хронограмм. Фазы гармоник случайные и могут меняться от одной гаммы к другой.

Все использованные волнограммы имеют длину 30 мин, после чего следует повтор первых 10 минут. Условно монохроматические и условно бихроматические волны 19 июня 2006 сгенерированы на основе эмпирически скорректированной трохoidalной теории с целью обеспечения постоянства формы волны вдоль всего лотка.

19.06.06

Опыт 1. Начало опыта 9-12 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 1045110, $H_{sig} = 1.1$ м, $T = 5$ с. Обрушение Sp 110м, 115м, 105м, 130м – редко. Sp или Pl 203-220 м всегда, потом бор до уреза. Видны ИГВ невооруженным глазом. Имена файлов 19060601.G01-G71 и 19060601.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 2. Начало опыта 10-14 по местному времени. Длина записи 20 мин. Режим S 1045100, $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 5$ с. Обрушение Sp 110, бор до 145 м. Иногда Pl 204-206 м или Sp 210-226 м, потом бор до уреза. Видны ИГВ невооруженным глазом. Имена файлов 19060602.G01-G71 и 19060602.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 3. Начало опыта 11-00 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 1045090, $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 5$ с. Обрушение Sp 135 м, 120 м очень редко. Pl 204-206 м или Sp 208-218 м, потом бор до уреза. Видны ИГВ невооруженным глазом. Имена файлов 19060603.G01-G71 и 19060603.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 4. Начало опыта 12-05 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 1545110, $H_{sig} = 1.1$ м, $T = 5$ с. Обрушение Sp 100-110 м, 120 м, 180. Редко Pl 100 м. Pl

204-206 м или Sp 210-226 м, потом бор до уреза. Видны ИГВ невооруженным глазом. Имена файлов 19060604.G01-G71 и 19060604.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 5. Начало опыта 13-05 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 1545100, $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 5$ с. Почти без обрушений. Sp тянется 100-150 м. 110-130 м – редко. Pl 204-206 м. Имена файлов 19060605.G01-G71 и 19060605.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 6. Начало опыта 15-10 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 1545090, $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 5$ с. Почти без обрушений: 1 раз в 2-3 минуты. Sp 100, 110, 120, 130 м. Pl – 110м. Тянется бор до 150 м. Pl 204-206 м. Имена файлов 19060606.G01-G71 и 19060606.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 7. Начало опыта 16-10 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 2545100, $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 5$ с. Почти без обрушений. Sp 100, 120, 130 м. Pl 110м, тянется бор до 150 м. Pl 204-206 м. Имена файлов 19060607.G01-G71 и 19060607.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

За четвертый день эксперимента были выполнены измерения по 7 задачам исследований. Всего за 4-й день записано 497 файлов с измеренными параметрами и 7 файлов со статистическими параметрами измерений по каждому опыту.

20.06.06

Опыт 2. Начало опыта 9-30 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 2545090, $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 5$ с. Обрушение Sp 110, бор до 150 м редко, раз в несколько минут. Большинство волн на грани обрушения. Но не обрушиваются. Pl 203, 204, 206 м. Имена файлов 20060602.G01-G71 и 20060602.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 3. Начало опыта 10-30 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 3345110, $H_{sig} = 1.1$ м, $T = 5$ с. Обрушение Pl 110 м 3 волны подряд, бор до 150 м. Первые 5 мин обрушений не было. Pl 202 или Sp 203 м, потом бор до уреза. Видны ИГВ невооруженным глазом. Имена файлов 20060603.G01-G71 и 20060603.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 4. Начало опыта 11-49 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 3345090, $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 5$ с. Обрушение Sp 110-120 м, 120-160 м, 140-160 м, редко Pl 100 м. Pl 204 м. Имена файлов 20060604.G01-G71 и 20060604.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 5. Начало опыта 13-15 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 3345100, $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 5$ с. Обрушения в районе 110-140 м 1 раз в 5-10 минут. Имена файлов 20060605.G01-G71 и 20060605.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 6. Начало опыта 14-30 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 6045100, $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 5$ с. Почти без обрушений, Sp-P1 120м, Sp 130 м, Sp 140 м. Имена файлов 20060606.G01-G71 и 20060606.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 7 (повтор 1). Начало опыта 16-10 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 2545110, $H_{sig} = 1.1$ м, $T = 5$ с. Обрушение один раз в несколько минут. Sp 110м, бор от 150 м до 160м. P1 100м-Sp110м 6 волн подряд в середине записи. Иногда слабый Sp от 110 до 140 м или от 110 до 130 м, или просто 135 м. P1 203-206 м всегда. Потом бор до уреза. Видны ИГВ невооруженным глазом. Имена файлов 20060607.G01-G71 и 20060607.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

За пятый день эксперимента были выполнены измерения по 6 задачам исследований. Всего за 5-й день записано 426 файлов с измеренными параметрами и 6 файлов со статистическими параметрами измерений по каждому опыту.

21.06.06

Опыт 1. Начало опыта 8-15 по местному времени. Длина записи 40 мин. Режим S 6045110, $H_{sig} = 1.1$ м, $T = 5$ с. Обрушение раз в несколько минут. P1 100 м, Sp 110м, бор от 150 м до 160м, P1-Sp110м. P1 203-206 м всегда. Потом бор до уреза. Имена файлов 21060601.G01-G71 и 21060601.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 2. Начало опыта 9-40 по местному времени. Длина записи 45 мин. Режим S 6045090, $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 5$ с. Обрушение как в режиме 1. С этого опыта и до конца увеличили время записи после остановки волнопродуктора до 6 мин. Имена файлов 21060602.G01-G71 и 21060602.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 3. Начало опыта 11-05 по местному времени. Длина записи 45 мин. Первые 5 минут обрушений не было. Очень разнокалиберное обрушение: мощно и редко. Многие волны на грани обрушения у отметки 110 м. Имена файлов 21060603.G01-G71 и 21060603.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 4. Начало опыта 12-38 по местному времени. Длина записи 45 мин. Режим S 9945100, $H_{sig} = 1.0$ м, $T = 5$ с. Обрушение P1 110-150 м, редко. P1 204 м, Sp 210 м. Имена файлов 21060604.G01-G71 и 21060604.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

Опыт 5. Начало опыта 14-07 по местному времени. Длина записи 45 мин. Режим S 9945090, $H_{sig} = 0.9$ м, $T = 5$ с. Обрушения как в предыдущем режиме. Имена файлов 21060605.G01-G71 и 21060605.GTX. Всего для опыта записано файлов – 72.

За шестой день эксперимента были выполнены измерения по 5 задачам исследований. Всего за 6-й день записано 355 файлов с измеренными параметрами и 5 файлов со статистическими параметрами измерений по каждому опыту.

Статистика исследований по режимам волнения с искусственными (нереальными) спектрами:

- количество исследованных режимов – 18;
- количество записанных файлов с данными – 1278;
- количество файлов со статическими параметрами измерений – 18.

На рис. 2.13 показан пример записи концентраций взвеси на разных горизонтах за время одного полного цикла измерения. На рис. 2.14 приведен снимок волны, приближающейся к точке установки приборов. На рис. 2.15 – вид на установленные приборы после сброса воды.

2.6.3. Статистические данные по полученной информации

Всего за время эксперимента проведено исследование 39 режимов волнения с естественными и искусственными спектрами. В их числе:

- количество исследованных режимов волнения, присутствующего в природе - 21;
- количество исследованных режимов волнения с искусственным спектром – 18;
- общее количество записанных файлов с данными – 2769;
- общее количество файлов со статическими параметрами измерений – 39;
- объем отснятого видео – 20 часов;
- количество сделанных фотоснимков - > 4000.

Таким образом, за короткий период эксперимента собран обширный банк данных уникальных экспериментов, моделирующих процессы интенсивного штормового воздействия. Анализ этого банка должен позволить значимо продвинуть наши представления о штормовой динамике береговой зоны.

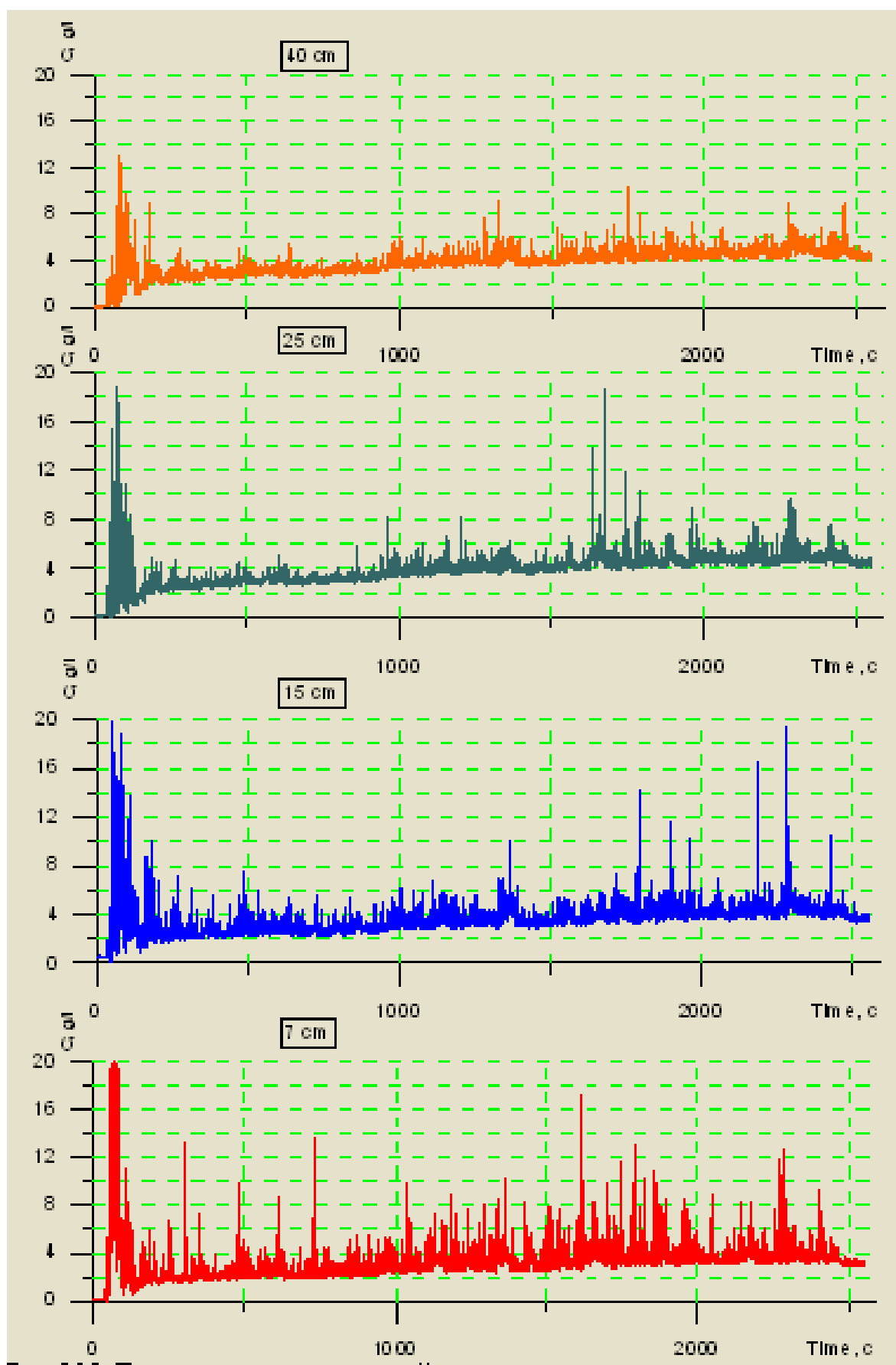


Рис. 2.13. Пример записи концентраций взвеси на разных горизонтах за время одного полного цикла измерения. Файлы 14060601.G57-G60.



Рис. 2.14. Снимок волны, приближающейся к точке установки приборов



Рис. 2.15. Вид на установленные приборы после сброса воды

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОСОВ, ВЗВЕШЕННЫХ НАД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОЛНЕНИЯ С ВЫРАЖЕННОЙ ГРУППОВОЙ СТРУКТУРОЙ

3.1. Постановка задачи

В настоящем разделе представлены результаты моделирования флуктуации концентрации песчаных наносов, взвешенных волнами с выраженной групповой структурой над плоским дном, что составляет часть ТЗ настоящего проекта. Достоверность модели проверена по данным лабораторных экспериментов, проведенных ранее в Большом волновом лотке Береговой исследовательской станции Университета Ганновера и Технического университета Брауншвейга (эксперимент SISTEX'99).

Как уже говорилось во вводной части отчета, в связи со сложностью проведения измерений в реальных морских условиях, количественная оценка и прогноз распределения взвешенных наносов в береговой зоне моря производятся преимущественно путем математического моделирования с использованием параметров, полученных в лабораторных условиях. К настоящему времени построено сравнительно много моделей распределения осредненных по времени концентраций взвешенных наносов в волновом потоке. Достаточно полный обзор подобных моделей сделан в работе Анцыферова С. М. и Акивис Т.М. (2002). Однако подход, основанный на использовании средних по времени значений концентрации и скорости воды, не учитывает временную изменчивость потока взвешенных наносов, и результирующие расчеты могут на порядки отличаться от реальных концентраций.

Проведенные ранее натурные (Black, Vincent, 2002; Kos'yan et al, 1996, 1997; Vincent et al, 1999) и лабораторные исследования (Van Rijn, 1993; Villaret, Perrier, 1992) показали, что флуктуационная составляющая играет важную роль в формировании результирующего потока взвешенных наносов. Большое количество моделей пространственно-временной изменчивости концентрации взвешенных наносов основаны на идее приоритета турбулентной диффузии (Davies, Li, 1997; Hagatun, Eidsvik, 1988) без учета наблюдаемых в природе механизмов взвешивания осадков, что приводит к значительным отличиям между натурными и расчетными данными (Kos'yan et al, 1996, 1997; Kuznetsov, Rykhov, 1997; Soulsby, 1985).

В ряде моделей пространственно-временная изменчивость концентрации взвеси в волновом потоке описывается с позиций процесса турбулентной диффузии и задания на дне граничного условия в виде функции концентрации от мгновенного значения параметра Шильдса (Davies, Li, 1997; Fredsoe., Andersen, Silberg, 1985). Эти модели дают удовлетворительное согласие с экспериментальными данными лишь для

монохроматических волн и гладкой фазы движения наносов, когда движение наносов имеет место в виде узкой полосы, толщиной порядка 1-2 см над плоским дном.

Ранее в результате натуральных и лабораторных экспериментов была продемонстрирована необходимость учета осцилляционных движений воды и фазового сдвига между флуктуациями концентрации взвеси и скорости воды на различных уровнях от дна (Kos'yan et al, 1996; Kuznetsov, Pykhov, 1997; Van Rijn, 1993; Villaret, Perrier, 1992). Установлено, что длительность и частота появления пиков концентрации, в значительной степени, определяется периодичностью следования групп высоких волн и количеством волн в отдельных группах (Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В., 2003).

В рамках работы по настоящему проекту проведено моделирование флуктуаций концентрации взвешенных песчаных наносов над гладким дном под волнами с выраженной групповой структурой. Для моделирования и проверки результатов из данных эксперимента «SISTEX'99» были отобраны серии синхронных записей концентрации взвешенных наносов, компонентов скорости воды и возвышения свободной поверхности для случая волнения с групповой структурой.

3.2. Условия базового эксперимента

Использованные для моделирования данные получены в эксперименте SISTEX'99 (Vincent C.E., Hanes, 1999), проведенном в том же Большом волновом канале в Ганновере (Германия), что и наши опыты, описанные во втором разделе отчета. Характеристики канала приведены в разделе 2.5 настоящего отчета. Песчаное дно канала было сформировано хорошо сортированным песком со средним диаметром 0.24 мм. Волнение в канале генерировалось при помощи системы подвижных волновых пластин с динамической обратной связью, снижающей влияние отраженных волн (см. раздел 2.5). В течение эксперимента были проведены опыты с генерированными нерегулярными волнами, волнением с четкой групповой структурой и с монохроматическим волнением. В каждом опыте измерялся вертикальный профиль концентрации взвешенных наносов, два компонента скорости воды (вертикальный и по оси потока) и возвышение свободной поверхности. Измерители концентрации взвеси и составляющих скорости жидкости крепились к расположенной в середине канала раме. Измерение скорости воды производилось на расстоянии 10-15 см от дна при помощи доплеровского акустического измерителя (ADV). Струнные волнографы, фиксирующие колебания поверхности воды, размещались вдоль стены канала. Концентрация взвешенных наносов измерялась при помощи высокочастотного (2, 4, 5 МГц) акустического излучателя (ABS) (Vincent., Green, 1990), установленного на расстоянии 35-40 см от дна. Концентрация взвешенных наносов

определялась в 101 точке по вертикали через 5 мм с частотой 3.133 Hz. Синхронные измерения концентрации взвешенного песка, компонент скорости воды и возвышений свободной поверхности выполнены в виде серий, каждая из которых содержит по 2050 отсчетов.

3.3. Модель распределения взвешенных наносов

3.3.1. Основные положения

В основу построенной модели положено одномерное диффузионное уравнение концентрации взвешенных наносов:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = w_s \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (3.1)$$

где $C(z,t)$ - концентрация взвешенных наносов; ε_s - коэффициент турбулентной диффузии частиц взвеси; w_s - скорость оседания частиц песка (гидравлическая крупность); t - время, z - вертикальная координата.

Согласно этому уравнению изменение концентрации во времени на любом горизонте от дна определяется изменением по вертикали локального баланса потока взвеси за счет оседания частиц (первый член правой части уравнения) и за счет потока взвеси от дна (второй правой части уравнения, соответственно).

3.3.2. Определение коэффициента диффузии

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

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_1(z) + \varepsilon_2(z) + \varepsilon_3(z). \quad (3.2)$$

Здесь $\varepsilon_1(z)$ - вклад орбитального движения, $\varepsilon_1(z) = \frac{\pi H^2 \sinh^2 kz}{2\sqrt{2T} \sinh^2 kh}$;

$\varepsilon_2(z)$ - вклад волнового течения, $\varepsilon_2(z) = \frac{\pi \chi^2 H^2 \sinh^3 2kz}{36T \sinh^2 kh \cosh^2 2kz}$;

$\varepsilon_3(z)$ - диффузия в донном слое, $\varepsilon_3(z) = \frac{b(u_g - w_s) \frac{z}{\delta}}{1 + 0.06 \frac{z}{\delta} \exp(\frac{z}{\delta})}$, где коэффициент b определяется

$$\text{как } b = 116 \left[\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right] \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}},$$

u_g - максимальное значение донной орбитальной скорости с компонентами

$$U = \frac{HTg}{2\lambda} \frac{\cosh(2\pi \frac{\delta+h}{\lambda})}{\cosh(2\pi \frac{h}{\lambda})}, \quad W = \frac{HTg}{2\lambda} \frac{\sinh(2\pi \frac{\delta+h}{\lambda})}{\cosh(2\pi \frac{h}{\lambda})},$$

δ – толщина пограничного слоя, определяемая из уравнения Джонсона (Jonsson, 1966):

$$\frac{\delta}{z_0} \lg\left(\frac{\delta}{z_0}\right) = 0.6 \frac{H}{D \sinh kh}, \quad (3.3)$$

где z_0 – параметр шероховатости, $z_0 = \frac{z_N}{30}$, z_N - эффективная шероховатость дна, которая для плоского песчаного дна принимается равной $z_N = 2.5\bar{d}$. (\bar{d} – средний диаметр частиц песка на дне); H , T , λ - высота, период и длина волны соответственно, h - глубина.

3.3.3. Граничные условия

На свободной поверхности воды поток взвеси принимается равным нулю

$$\varepsilon_s \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + w_s \cdot C = 0 \quad \text{при } z = H \quad (3.4)$$

На нижней границе концентрация взвеси описывается выражением:

$$C(0,t) = A p(t), \quad (3.5)$$

где $p(t)$ – функция локального выброса взвеси (pick-up функция), определяемая выражением (Zou et al, 2005)

$$p(t) = 3.3 \left(\frac{\theta(t) - \theta_{cr}}{\theta_{cr}} \right)^{1.5} \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{v^{0.2}}, \quad (3.6)$$

где $s = \rho_s / \rho$ – относительная плотность наносов, g – ускорение свободного падения.

Взвешивание наносов при прохождении индивидуальных волн происходит не на протяжении всего периода, а виде быстрого выброса облака взвеси. Анализ натуральных данных показал, что выброс происходит один раз за период в фазу уменьшения горизонтальной компоненты скорости от максимума до нуля. Этот факт учитывается введением коэффициента A , который, изменяясь в пределах $0 \leq A \leq 1$, равен единице в фазу волны, когда происходит взвешивание, и нулю – в остальных случаях. Это касается как одиночной волны, так и групп волн, рассматриваемых в терминах огибающей.

Мгновенное значение параметра Шильдса отражает баланс сдвигающих и удерживающих сил:

$$\theta(t) = \frac{u_*^2(t)}{((\rho_s - \rho) / \rho) \cdot g \cdot d_{50}}, \quad (3.7)$$

где d_{50} – медианный диаметр наносов; $u_*(t)$ – максимальная сдвиговая скорость, рассчитываемая по ряду скорости потока $U(t)$.

3.3.4. Определение максимальной сдвиговой скорости

При данных волновых характеристиках находим $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $A_{bm} = \frac{u(t)}{\omega}$.

В предположении сильной турбулентности волнового пограничного слоя $k_n = D$ выполнена итеративная процедура (Walton, 2002)

$$\frac{1}{x^{(n+1)}} = \left(\log_{10} \frac{A_{bm}}{k_n} - 0.17 \right) - \log_{10} \frac{1}{x^{(n)}} + 0.24x^{(n)} \quad (3.8)$$

при начальном значении $x^{(0)} = 0.4$.

В приведенном выражении $x = 4\sqrt{f_\omega}$, где f_ω – волновой фактор трения.

Решение уравнения дает значение волнового фактора трения $f_w = \left(\frac{x^{(m)}}{4} \right)^2$ и максимальной

сдвиговой скорости $u_*(t) = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u(t)$.

3.4. Исходные данные

В качестве исходных данных приняты результаты измерений профилей скорости, возвышения уровня и концентраций взвешенных осадков при выраженной групповой структуре волнения (серия CGA01 эксперимента «SISTEX'99», рис. 3.1).

Средние параметры волнения, необходимые для проведения расчетов, можно получить либо путем определения спектральных характеристик волнения, либо непосредственно по волнограмме.

Рассчитанная спектральная плотность ординат свободной поверхности содержит два основных (характерных для групповой структуры волнения) пика на частотах 0.13 и 0.25 Гц.

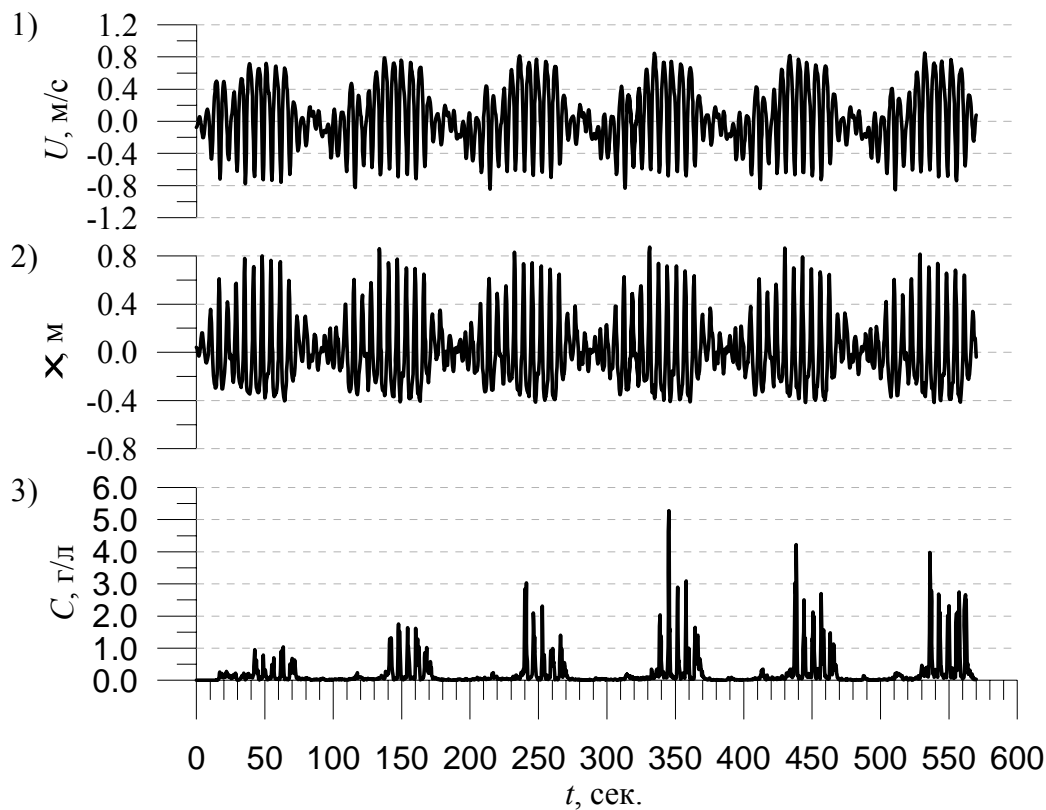


Рис. 3.1. Серия CGA01 эксперимента SISTEX'99: 1) – горизонтальные компоненты скорости потока; 2) – возвышение свободной поверхности; 3) – концентрация взвешенных частиц на расстоянии 5-6 см от дна.

Спектральные моменты (математическое ожидание m_0 и дисперсия m_2), представляемые в виде $m_n = \int f^n S(f) df$, составляют: $m_0=0.0686$, $m_2=0.1262$.

Для рассматриваемой записи, приведенной на рис. 3.1, значительная высота волн

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 1.10 \text{ м (средняя высота 0.69 м), и средний период } T_z = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = 4.66 \text{ с.}$$

3.5. Результаты

При расчетах использовался равномерный шаг сетки по глубине и по времени, составляющий $\Delta z=0.005$ м и $\Delta t=0.228$ с. В рассматриваемой модели использовались следующие значения параметров: $w_s = 0.025$ м/с для песка со средним диаметром 0.24 мм; $\theta_{cr} = 0.045$ - критическое значение параметра Шильдса для начала движения донных наносов, кинематическая вязкость воды $\nu=10^{-6}$ м²/с.

Оценки вертикального профиля обобщенного коэффициента диффузии показали, что вклад в него коэффициента $\varepsilon_2(z)$ на два порядка меньше, чем от остальных слагаемых (рис. 3.2). При проведении расчетов вкладом $\varepsilon_2(z)$ в коэффициент диффузии можно пренебречь.

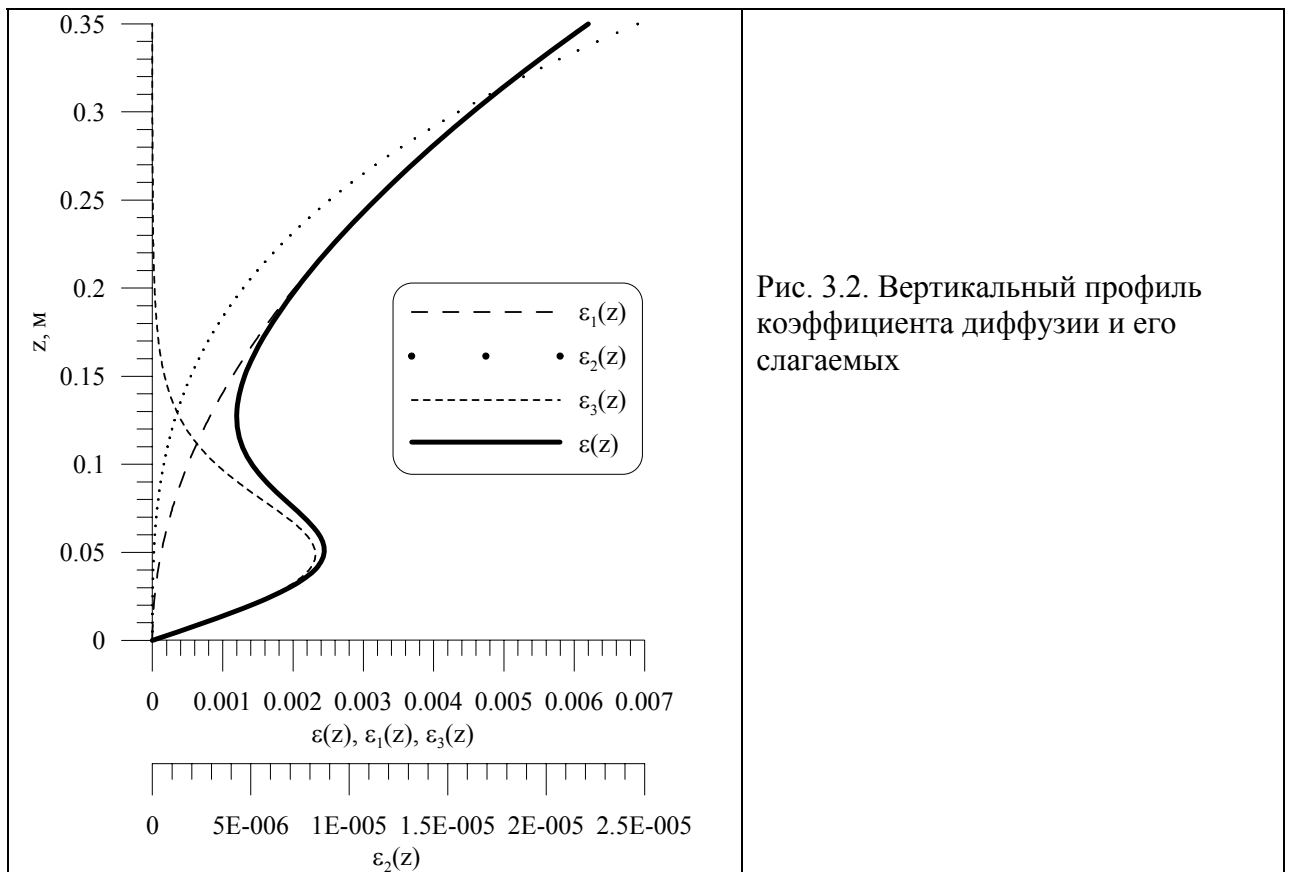


Рис. 3.2. Вертикальный профиль коэффициента диффузии и его слагаемых

На рис. 3.3 приведено сравнение хронограмм концентраций, рассчитанных по модели, с измеренными для горизонта 5.5 см от дна. Расхождения в абсолютных значениях пиков концентрации, полученных экспериментально и модельным путем, вызвано тем, что в модели заложено постоянство гранулометрического состава взвеси по вертикали, в частности, медианного диаметра частиц взвеси.

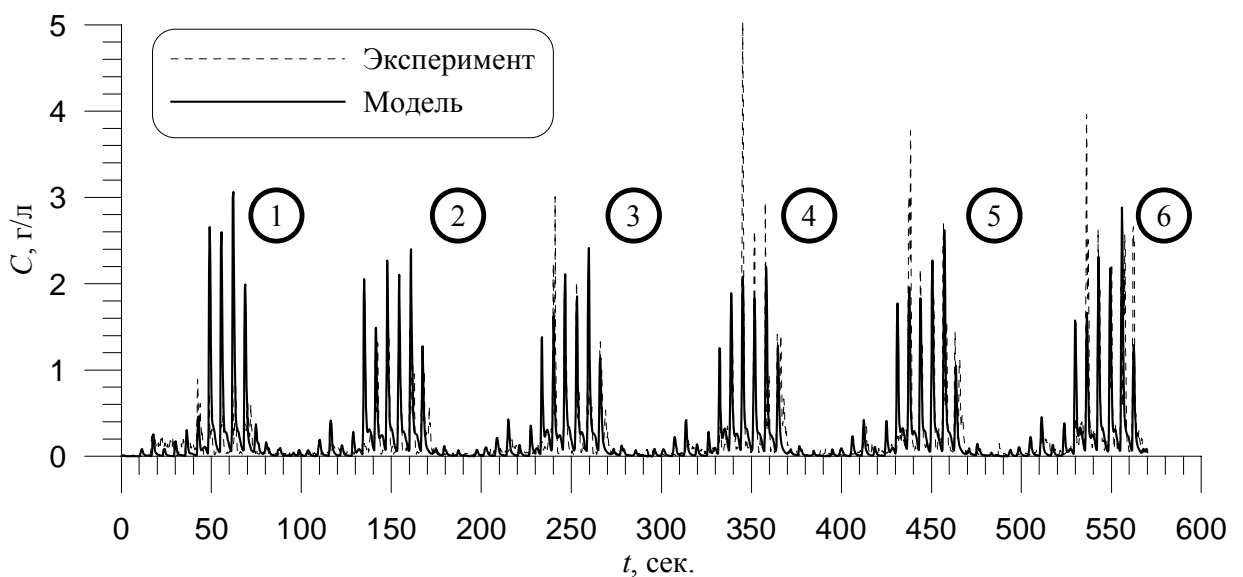


Рис. 3.3. Концентрация взвешенных наносов на расстоянии 5.5 см от дна. Экспериментальные и рассчитанные по модели данные (цифры - группы волн).

Это сказывается на корректности описания скорости осаждения частиц. Экспериментально подтверждено (Онищенко Э. Л., Косьян, 1998), что средний и медианный диаметр частиц взвеси при удалении от дна уменьшается, следовательно, снижается и значение скорости оседания.

На рис. 3.3 явно выделяются шесть областей взвешивания, соответствующие группам волн (помечены цифрами 1-6). Хронограммы горизонтальных скоростей (U), экспериментальных (C_{exp}) и модельных концентраций (C_{mod}) для этих групп приведены на рис. 3.4.

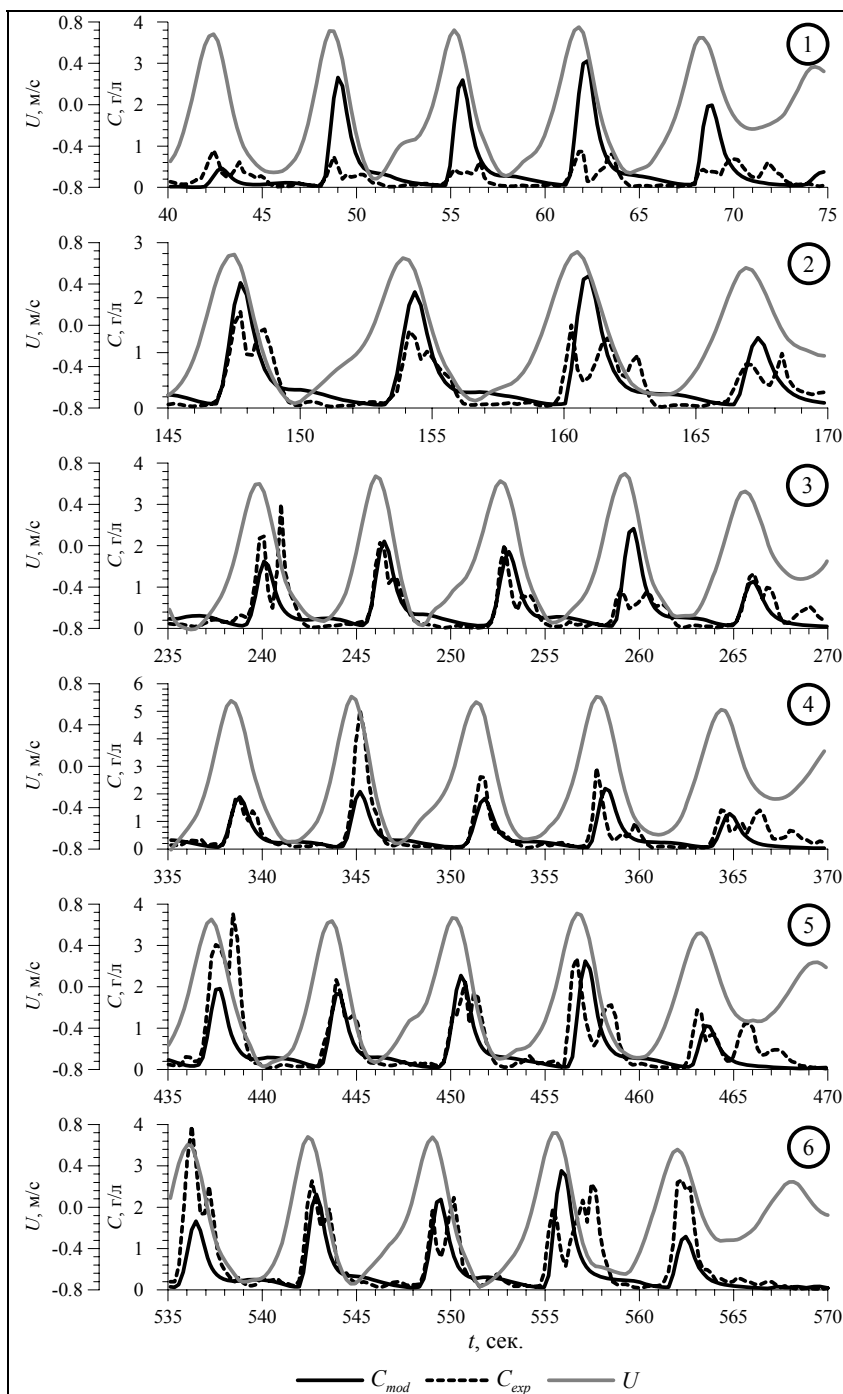


Рис. 4. Экспериментальные и модельные концентрации взвешенных наносов под выделенными группами волн

В пределах каждой группы проведено осреднение вертикальных профилей концентраций, как для экспериментальных, так и модельных данных (рис. 3.5). Полученные профили аппроксимируются экспоненциальной функцией вида

$$C(z) \propto a \exp(-bz),$$

где a и b – параметры формы.

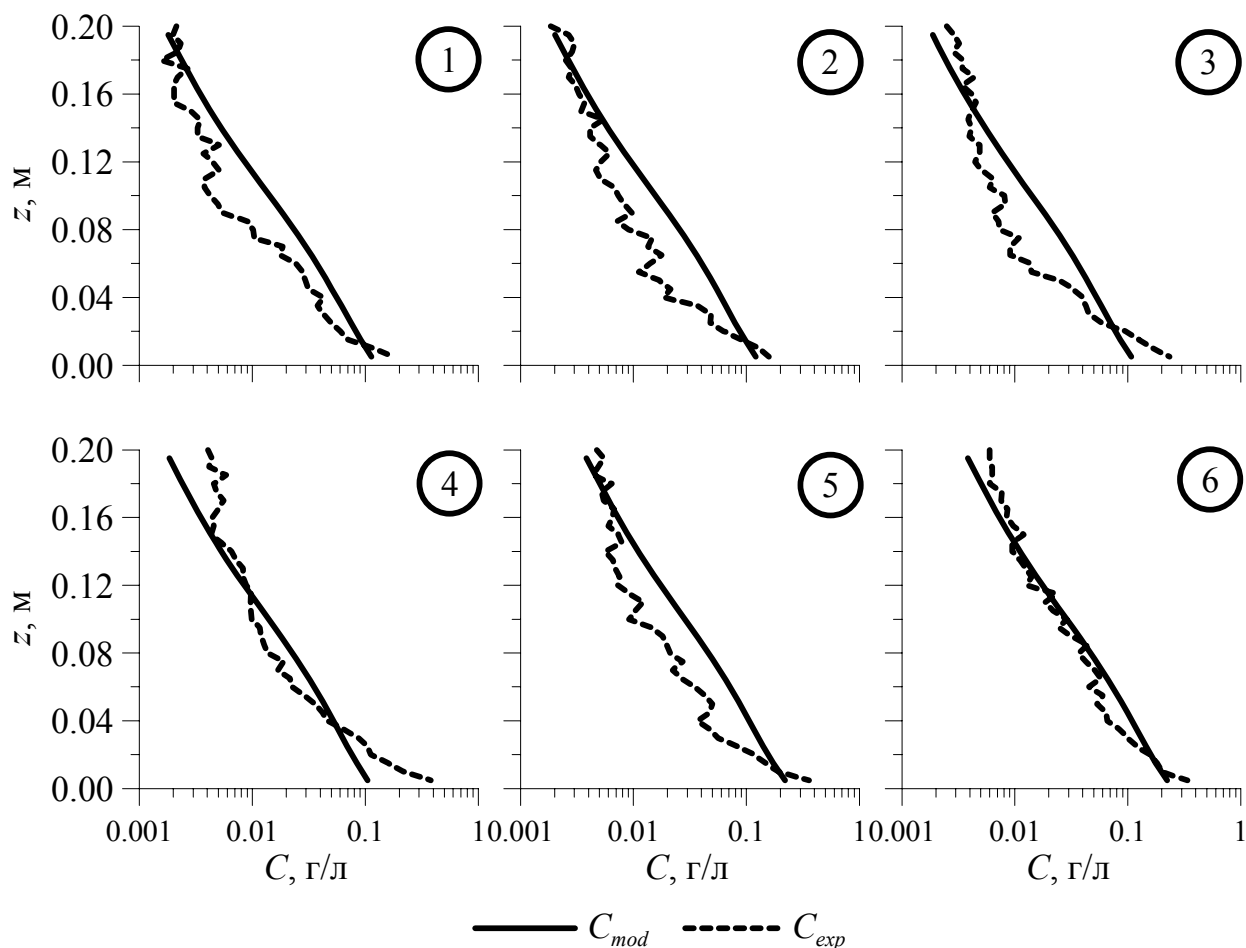


Рис. 3.5. Осредненные для групп волн вертикальные профили концентраций. Экспериментальные и модельные данные

Присутствующие 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 горизонтальной компоненты скорости потока, возвышения уровня и концентраций взвеси (экспериментальной и модельной) приведены на рис. 3.6.

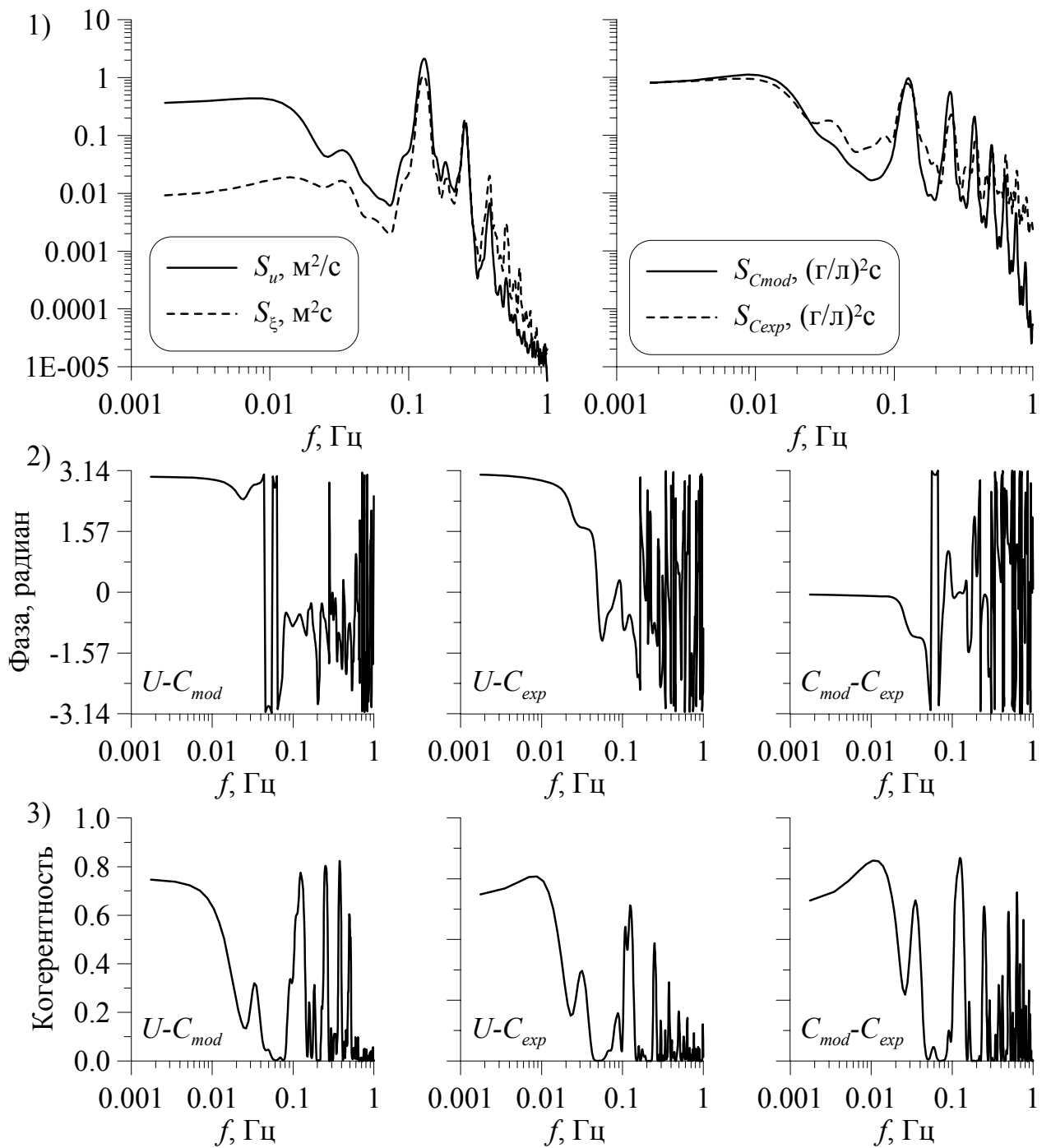


Рис. 3.6. Спектральный анализ хронограмм горизонтальной компоненты скорости потока, возвышения уровня и концентраций взвеси (экспериментальной и модельной)

Все автоспектры характеризуются выраженными локальными максимумами на частотах 0.13 и 0.26 Гц (рис. 3.6.1). На этих же частотах фазовый сдвиг между экспериментальными концентрациями взвеси C_{exp} и рассчитанными C_{mod} близок к нулю, и приблизительно равен $-\pi/4$ между горизонтальной компонентой скорости U и концентрациями взвеси (рис. 3.6.2). Рис. 3.6.3 демонстрирует довольно высокую

когерентность между всеми рассматриваемыми параметрами (U , C_{exp} , C_{mod}) как на низких частотах, так и на частотах максимумов спектральных плотностей. Таким образом, модельный ряд концентраций взвеси статистически соответствует экспериментальному.

Таким образом, разработана модель для расчета флуктуаций концентрации взвешенных наносов над плоским дном под воздействием групп волн. Она учитывает влияние групповой структуры волнения и фазы индивидуальных волн на взвешивания осадков, что очень важно при моделировании флуктуаций концентрации взвеси. Модель хорошо отражает все качественные особенности взвешивания наносов в рассматриваемых условиях волнения.

Вместе с тем, реальные процессы взвешивания наносов сложнее заложенных в модель механизмов. Представленная модель взвешивания донных осадков будет совершенствоваться с привлечением результатов теоретических исследований и экспериментальных данных, в первую очередь, данных полученных в нашем эксперименте «Ганновер 2006».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный комплекс исследований, итоги которых приведены в настоящем отчете, полностью соответствуют Техническому заданию Госконтракта, включающему:

- натурные исследования состояния берегов Греции и анализ хода эрозионных процессов на них с целью сопоставления с береговыми процессами на южных морях России;
- лабораторный эксперимент в Большом волновом канале Береговой исследовательской станции Университета Ганновера и Технического университета Брауншвейга;
- моделирование распределения и флуктуации концентрации песчаных наносов, взвешенных волнами с выраженной групповой структурой над плоским дном.

По всем направлениям исследований получены вполне удовлетворительные результаты.

Особенностью береговой линии Греческого полуострова и островов, входящих в состав Греции, является ее значительность по сравнению с площадью территории. Прибрежные участки представлены множеством форм рельефа, таких как скалистые берега, клифы, пляжи и дельтовые побережья. Строение многих участков сходно с таковым ряда участков черноморского побережья России и Грузии. До 75-80% берегов Греции, составляют клифы и скалистые берега, которые относительно устойчивы к процессам береговой эрозии. Но там, где клифы состоят из более мягких пород, т.е. сланцы и флиши, эрозия протекает также быстро, как и на российских берегах Черного моря.

Выполненное более детальное обследование острова Родос позволило выделить на его побережье ряд литодинамических систем и дать их краткое описание.

До сих пор основными методами изучения береговых процессов греческого побережья были геоморфологические наблюдения и оценки, что явно недостаточно для надежного долгосрочного прогноза их развития. Применение современных количественных технологий наблюдения за штормовой динамикой затруднено отсутствием на побережье (о.Родос) стационаров или специально оборудованных полигонов. Для постановки таких наблюдений на этом побережье потребуется разработка автономных методов наблюдений. Развитие этого направления весьма целесообразно, но требует значительных вложений и времени.

Другим путем, в принципе позволяющим строить динамический прогноз, является дополнение геоморфологических исследований физическим и математическим моделированием приборов. В настоящих условиях этот путь оказался более эффективным, поэтому следующим этапом исследований по проекту явилась постановка лабораторного эксперимента в Большом волновом канале (Ганновер, Германия), являющимся лучшей в Европе лабораторной установкой, позволяющей моделировать штормовые динамические

процессы практически без искажения масштаба, что чрезвычайно важно, так как при ином масштабе моделирования оказывается невозможным одновременно соблюсти подобие гидродинамических и литодинамических процессов. За короткий период эксперимента собран обширный банк данных уникальных экспериментов, моделирующих процессы интенсивного штормового воздействия. Анализ этого банка должен позволить значимо продвинуть наши представления о штормовой динамике береговой зоны.

По-видимому, единственным аналогом этого эксперимента является проеденный ранее международный эксперимент «SISTEX'99», результаты которого были любезно предоставлены нам его руководителем К.Винсентом, что вместе с проведенным нами теоретическим анализом проблемы динамики взвешенных наносов, позволило уже сейчас разработать модель для расчета флуктуаций концентрации взвешенных наносов над плоским дном под воздействием групп волн. Модель учитывает влияние групповой структуры волнения и фазы индивидуальных волн на взвешивания осадков, что очень важно при моделировании флуктуаций концентрации взвеси. Она хорошо отражает все качественные особенности взвешивания наносов в рассматриваемых условиях волнения. Разработанная модель взвешивания донных осадков в дальнейшем будет совершенствоваться с привлечением результатов теоретических исследований и экспериментальных данных, полученных в нашем эксперименте.

Вместе с тем, реальные процессы взвешивания и движения наносов сложнее и разнообразнее заложенных в модель механизмов. Это определяет необходимость развития не только теоретических и лабораторных, но и натурных исследований. В соответствии с этими представлениями в рамках работ по проекту «Динамика береговой зоны: новые технологии измерений транспорта наносов, эрозия берегов» выполнено комплексное исследование, включающее натурные наблюдения, уникальный лабораторный эксперимент и математическое моделирование.

Список использованных источников

1. Анцыферов С.М., Акивис Т.М. Модель транспорта наносов, взвешенных приливным течением в береговой зоне моря. *Океанология*, 2002, т.29, №4. С. 502-512.
2. Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В. (Ред.) *Динамические процессы береговой зоны моря*. Москва, «Научный мир», 2003. 326 с.
3. Онищенко Э. Л., Косьян Р. Д. О применении оптического метода определения концентрации взвешенных наносов в природных водоемах. М.: *Водные ресурсы*. 1989, вып. 3. С. 94-101.
4. Отчет о научно-исследовательской работе по ФЦП «Мировой океан» в подпрограмме «Исследование природы Мирового океана» Тема 7. Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов Черного и Азовского морей. ЮО ИО РАН. Геленджик 2004
5. Anagnostou Ch., Tvalchrelidze M., Karageorgis A., Lominadze G., Chronis G. Coastal erosion problems: an inter-comparison based on case studies of Greek coasts (Aegean Sea) and Georgian coast (Black Sea) // *Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea*. Ankara. Turkey. 2003. P. 986-993.
6. Anagnostou Dy.Ch., Chronis G., Sioulas A., Karageorgis A.P., Tziavos Ch. Morphodynamics and changes of the coastline of Hellas // *State of the Hellenic Marine Environment*. Athens. 2005. P. 21-33.
7. Black K., Vincent C.E. High-resolution field measurements and numerical modeling of intra-wave sediment suspension on plane beds under shoaling waves. // *Coastal Engineering*, 2002, 42. P. 173-197.
8. Davies A.G., Li Z. Modeling sediment transport beneath regular symmetrical waves above a plane bed. // *Cont. Shelf. Res.* 1997, 17 (5). P. 555-582.
9. Drakopoulos I., G.Stavarakakis, I.Latoussakis, G.Drakatos and D.Papanastasiou. A reexamination of earthquake prediction along the southeastern part of the Hellenic Arc. *Bull. Geol. Soc. Greece*. 1988. XXIII/3, 145-155. Fredsoe J., Andersen O.H., Silberg S. Distribution of suspended sediment in large waves // *J. Waterways. Port, Coast. and Ocean Eng.* 1985, Vol. 111. P.1041-1059.
10. Hagatun K., Eidsvik K.L. Oscillating turbulent boundary layers with suspended sediment // *J. Geophys. Res.* 1988, Vol.91. P. 13045-13055.
11. Jonsson J.G. On the existence of universal velocity distributions in an oscillatory, turbulent boundary layer. // *Basic Res. Progress Rep., Coastal Eng. Lab. Tech., Univ. of Denmark*, 1966,12.
12. Le Pichon X., Angelier J. The Hellenic Arc and trench system: a key to the neotectonic evolution of the eastern Mediterranean area. *Tectonophysics*, 1979 (60), 1-42.
13. Lekkas E., D.Papanikolaou and D.Sakellariou. Neotectonic map of Greece, 1:100 000 scale, Sheet Rhodos". Univ. of Athens/Earthquake Planning and Protection Organization, 1993.
14. Meulenkamp J.E., E.F.J.Mulder, and A.Van De Weerd. Sedimentary history and paleogeography of the Late Cenozoic of the island of Rhodos. *Z. Deutsch. Geol. Ges.* 1972. 123/2. 541-553.

15. Pirazzoli P.A., L.F.Montaggioni, J.F. Saliege, G.Segonzac, Y.Trommeret and C.Vernaud-Grazzini. Crustal block movements from Holocene shorelines: Rhodes Island (Greece). *Tectonophysics*. 1989, (170), 89-114.
16. Sakellariou D., Lykousis V., Russakis G., Georgiou P. Slope failure and associated coastal erosion in tectonically active areas: the coastal zone of Rhodes city (Rhodes Island, Greece) as a case example // *Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea*. Ankara. Turkey. 2003. P. 978-985.
17. Kos'yan R. Vertical distribution of suspended sediment concentrations seawards of the breaking zone. // *Coastal Engineering*, 1985, 9. P. 171-187.
18. Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V. Suspended sediment transport in the surf zone of the Nordeney Island. *Hydrodynamics, Theory and Applications*. // Proc. 2-nd Internal Conference on Hydrodynamics, Rotterdam, A.A.Balkema Publ. 1996, P. 1119-1123.
19. Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V., Krylenko M.V. Sand suspension and intermittence of turbulence in the surf zone. // Proc. of the 25 Int. Conference on Coastal Engineering, "COASTAL ENGINEERING'96", American Society of Civil engineering. New York. 1997, P.4111-4119.
20. Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V. Spectral test of energetic approach for suspended sand transport in the surf zone. // Proc. of International Conference "Coastal Dynamics'97", ASCE. 1997, P.227-234.
21. Soulsby R.L. The "Bailard" sediment transport formula: comparisons with data and models. // MAST 68-M Final Workshop. Gdansk. 1985, P.2-46 – 2-51.
22. Van Rijn L.C. Principles of sediment transport in rivers, estuarine and coastal seas. Aqua Publication. Netherlands. 1993, 860 p.
23. Villaret C., Perrier G. Transport of fine sand by combined waves and currents: an experimental study. // Electricite de France Report № HE-42/92.68. 1992, 81p.
24. Vincent C.E., Green M.O. Field measurements of the suspended sand concentration profiles, and of the resuspension coefficient over a rippled bed. *Journal Geophysical Research*, 1990, 95, P.15591-15601.
25. Vincent C.E., Hanes D. The accumulation and decay of near-bed suspended sand concentration due to waves and wave groves. // *Continental shelf research* 2002, V.22.
26. Vincent C.E., Marsh S.V., Webb M.P., Osborne P.D. Spatial and temporal structures of suspension and transport over mega-ripples on the shore face. // *J. Geophysical Research*, 1999, V. 104. 11215-11224.
27. Walton T. (editors). *Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-6, Engineer Manual 1110-2-1100*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
28. Zou S., Dalrymple R., ASCE F., Rogers B. Smoothed particle hydrodynamics simulation on sediment suspension under breaking waves. // *Ocean waves measurement and analysis, Fifth Inter. Symposium Waves 2005*. Madrid, Spain. 2005, Paper number:186.