

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений .....	5
1. ВВЕДЕНИЕ .....	6
2. ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОРТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ .....	7
2.1. Методы оценки обеспеченности экстремально высоких значений океанографических характеристик в условиях изменения климата.....	7
2.2. Спектральная модель ветрового волнения SWAN .....	8
2.3. Рефракционно-дифракционная модель приближения пологих склонов HWAVE.....	9
2.4. Полуспектральная модель HWAVE-S .....	9
2.5. Рефракционно-дифракционная модель ARTEMIS .....	9
2.6. Программный комплекс MIKE 21 .....	10
3. ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН НАТУРНЫМИ И ЛАБОРАТОРНЫМИ ДАННЫМИ .....	11
3.1. Верификация ветроволновой модели по данным натурных наблюдений.....	11
3.2. Верификация волновой модели ARTEMIS по данным физического моделирования .....	18
4. ПОРТЫ С НАВИГАЦИОННЫМИ КАНАЛАМИ .....	25
4.1. Сухогрузный район порта Тамань.....	25
4.2. Порт Сабетта-Утренний.....	28
5. ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ НА ЭТАПАХ СТРОИТЕЛЬСТВА .....	34
6. СРАВНЕНИЕ КОМПОНОВОК ОГРАДИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	40
7. ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ И УСЛОВИЯ ШВАРТОВКИ СУДОВ У ПРИЧАЛОВ .....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	54

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ГТС — гидротехнические сооружения
- ИФР — интегральные функции распределения
- МГМ — метод годовых максимумов
- МРИР — метод распределений исходных рядов
- ОГТ — основание гравитационного типа
- ПВП — «пики-выше-порога»
- СГК — стабильный газовый конденсат
- СПГ — сжиженный природный газ
- УПС — уравнение пологих склонов
- ФРВ — функции распределения вероятностей
- ЦСКМС — Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений
- GEV — generalised extreme value
- GRD — обобщенное распределение Парето
- POT — peak-over-threshold

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание прибрежных гидротехнических сооружений (ГТС), в том числе морских портов, в современных условиях основывается на совместном использовании методов физического и математического моделирования. Причем для объектов значительной важности для повышения достоверности результатов математического моделирования оно проводится на основе нескольких альтернативных программных комплексов.

В процессе проектирования ГТС, которые в период эксплуатации будут подвергаться воздействию ветровых волн, возникает ряд вопросов, не решаемых в полной мере чисто теоретическим путем. Это связано, в первую очередь, с многообразием исходных данных, подлежащих соответствующему учету на разных стадиях проекта. В действующих нормативных документах могут также отсутствовать необходимые рекомендации для того или иного расчетного случая конкретного проекта, ранее не встречавшегося в проектной практике. Очень часто приходится учитывать взаимовлияние различных факторов на работу проектируемых объектов. Следует особо отметить, что все ГТС в своем роде уникальны.

В мировой практике исследования волновых воздействий на ГТС проводятся теоретическим и экспериментальным путями. Эксперимент является основным критерием оценки результатов теоретических исследований. Наиболее распространены исследования на физических моделях, поскольку они позволяют достоверно, без существенных экономических затрат изучать поведение будущих ГТС, в том числе в экстремальных ситуациях. Таким образом, лабораторные исследования позволяют решать ряд задач научного сопровождения при проектировании реальных ГТС.

Создание прибрежных ГТС, в том числе новых морских портов, в современных условиях основывается на совместном использовании методов физического и математического моделирования. Причем для объектов значительной важности для повышения достоверности результатов математического моделирования его результаты уточняются с помощью лабораторных исследований.

Целью данного пособия является представление информации о технологии численного моделирования ветровых волн в задачах морской гидротехники. Рассмотрены примеры верификации численных моделей лабораторными и натурными данными. Также продемонстрированы особенности расчета волнового режима порта с использованием численных моделей для различных объектов.

Все применяемые модели не противоречат методам расчета волн, ветра и течений на открытых и огражденных акваториях, изложенных в нормативных документах [1, 2], а развивают эти методы в соответствии с современным уровнем развития волновой теории, портовой гидравлики и гидротехники. Такой подход обеспечивает выполнение исследований на современном научном уровне, что позволяет получить безопасные проектные решения.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОРТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

По сложившейся в настоящее время технологии современного математического моделирования в задачах морской гидротехники и гидравлики (проектирования портов и берегозащитных сооружений), в задачах такого рода выделяются следующие основные этапы:

1. Расчет климатических характеристик ветрового волнения в заданных точках на подходе к исследуемому объекту (порт, участок побережья) на основе спектральных моделей ветрового волнения по полям ветра над морем за многолетний (25–50 лет) период при использовании полей метеоэлементов из реанализа метеополей NCEP/NCAR или ERA-40, их возможном даунскейлинге, применении численных моделей прогноза погоды.

2. Расчет волнового режима прибрежной зоны или огражденной морской акватории на основе уравнений пологих уклонов — mild slope equations (в эллиптическом, параболическом или гиперболическом приближении), нелинейных уравнений длинноволновой теории мелкой воды и/или уравнений нелинейно-дисперсионной модели типа Буссинеска.

3. Расчет прибрежных течений, генерируемых при совместном влиянии ветра, волн и морских приливов, с учетом возможного обратного влияния течений на трансформацию волн.

4. Расчет транспорта наносов в прибрежной зоне и переформирований дна и берегов.

### 2.1. Методы оценки обеспеченности экстремально высоких значений океанографических характеристик в условиях изменения климата

В современной мировой практике используются три метода статистического анализа экстремальных значений океанографических (гидрометеорологических) параметров на основе подходов, развитых в теории статистики экстремальных значений. Рассмотрим эти подходы на примере статистики экстремальных ветровых волн с учетом того, что такие же подходы применимы для статистики экстремальных значений скоростей течений и других гидрометеорологических характеристик.

#### Метод распределений исходных рядов (МРИР)

В рамках МРИР эмпирические функции распределения вероятностей (ФРВ) и кривые обеспеченности — интегральные функции распределения (ИФР) строятся на основании всего ряда наблюдаемых или промоделированных за расчетный период значимых высот волн. Графики ИФР или построенные на их основе аппроксимационные формулы обычно используются для экстраполяции высот волн до экстремальных значений за пределы диапазона наблюдений, для того чтобы определить высоты волн повторяемостью раз в 100 лет или более редкой. Слабые стороны МРИР проявляются в том, что метод требует обработки больших наборов данных (наблюденные/моделируемые значения за каждый день или за несколько часов), и при этом такие ряды содержат и статистически зависимые значения, принадлежащие к одному и тому же шторму. Логнормальное распределение и распределения Вейбулла широко применяются для расчета высот волн малой обеспеченности по МРИР.

#### Метод «Пики выше порогового значения»/обобщенное распределение Парето

В методе «Пики выше порогового значения» (peak-over-threshold — POT) из каждого шторма выбирается только максимальное (пиковое) значение высоты волн. Шторм определяется как непрерывная последовательность значений высот волн, превышающих определенное высокое значение (пороговое значение высоты волн). В соответствии с теорией статистики экстремальных значений распределения пиковых значений из такой выборки следуют обобщенному распределению Парето (GPD). Экстраполяция «хвостов» GPD используется для оценки высот волн редкой повторяемости. В работе [3] указывается, что POT/GPD-подход имеет два следующих важных преимущества по сравнению с МРИР:

а) если волновой климат содержит более одного распределения, в связи с существованием нескольких различных физических режимов формирования поля волн, при построении статистики только по высоким значениям выше пороговых, высоты волн малой повторяемости, определенные методом POT, точнее будут соответствовать именно статистике самых высоких значений, не затененных статистикой высот волн умеренной высоты;

б) при выборе из шторма только пикового значения отсеются статистически зависимые значения внутри одного шторма, которые могут исказить статистику экстремальных волн малой повторяемости.

В России метод POT под названием «Пики-Выше-Порога» (ПВП-метод) применяется в Государственном океанографическом институте для изучения статистики экстремальных волновых характеристик с использованием распределения Вейбулла для аппроксимации распределений высот волн в полученной выборке «над порогом», а также в Институте океанографии РАН им. П.П. Ширшова для анализа статистики экстремально высоких волн по данным визуальных корабельных наблюдений.

### Метод годовых максимумов

Если выборка строится произвольным образом из исходных рядов, то, в соответствии с теорией статистики экстремальных значений, распределение максимальных значений в такой выборке будет подчиняться обобщенному распределению экстремальных значений (generalised extreme value (GEV) distribution). Метод годовых максимумов (МГМ) предполагает, что из многолетнего ряда наблюдений формируется ряд годовых максимумов. Параметры распределения GEV (три предельных случая которого — это распределения Вейбулла, Гумбеля и Фреше) могут быть оценены по обработке наборов данных годовых максимумов высот волн. Высоты волн экстремально редкой повторяемости могут быть вычислены экстраполяцией соответствующих значений GEV распределений в области экстремальных значений. Для двух видов статистического анализа: POT/GPD и МГМ/GEV отмечается близость результатов при использовании различных подмножеств одного набора данных, как по форме распределений, так и по оценкам обеспеченности волн малой повторяемости.

Оценке влияния глобальных изменений климата на динамику океанографических процессов в океане посвящено огромное количество работ, обобщение которых представлено в отчетах Международной комиссии по изменениям климата ООН, монографиях и обзорах. Развитие дистанционных спутниковых методов наблюдений за состоянием мирового океана позволило систематизировать глобальные изменения в характеристиках экстремальных волн в океане. Общепринятая методология расчетов океанографических параметров в условиях климатических изменений основана на использовании проекций — сценариев глобальных метеорологических процессов в XXI веке, рекомендованных Межправительственной группой экспертов по изменению климата, с последующим расчетом изменений уровня моря глобальными океанологическими моделями. Результаты таких расчетов относительно глобального изменения полей ветра и уровня моря используются для корректировки расчетов высот волн, скоростей течений и интенсивности размывов в районе проектирования порта.

## 2.2. Спектральная модель ветрового волнения SWAN

Спектральная модель Технического университета Дельфт (Дания) SWAN [4], распространяемая в открытых кодах, в последнее десятилетие стала общепринятым в мировой практике береговой инженерии инструментом для расчета трансформации ветровых волн из зон глубоководья в прибрежную зону. COASTOX-M включает модуль постпроцессинга последних версий модели, также реализованных на неструктурированных сетках, для передачи результатов SWAN в другие модули системы COASTOX.

Модель основана на уравнении баланса плотности волнового действия (или баланса сохранения энергии при отсутствии течений) с источниками и стоками. Модель описывает следующие волновые процессы:

- генерация волн ветром;
- распространение волн в области переменной глубины;
- изменение амплитуды волны в результате изменений глубины и течения;
- рефракция вследствие изменений глубины и течения;
- дифракция;
- блокирование и отражение волн противоположно направленными течениями;
- прохождение волн через затопленные препятствия.

В модели также рассмотрены процессы генерации волн ветром и диссипации:

- диссипация, вызванная обрушением волн на глубокой воде;
- диссипация, вызванная обрушением волн вследствие изменения глубины;
- диссипация в результате донного трения;
- волновое взаимодействие на глубокой и мелкой воде.

Модель SWAN может применяться как в декартовых или криволинейных координатах, так и в сферических, в зависимости от масштабов рассматриваемой области. Режим времени используется в двух опциях: стационарной и нестационарной. Стационарную моду следует использовать в случае распространения волн на относительно небольших масштабах. Вычислительная схема SORDUP второго порядка и схема третьего порядка Stelling&Leendertse (SWAN, v.40.51, v.40.72) применяются, соответственно, для стационарных и нестационарных задач. Дифракционные процессы в SWAN рассматриваются приближенно и не могут детально описывать волновые поля в районе взаимодействия волн с ГТС.

Спектральная модель с открытым кодом SWAN в последние десятилетия стала мировым стандартом в расчетах волновых полей, в глубоководной части моря и прибрежных районах, проектов морской гидротехники. Широкое применение модель нашла и в инженерных проектах ведущих научных центров и организациях России в области расчетов волновых режимов прибрежных акваторий. Хорошее согласие этих моделей с данными инструментальных наблюдений подтверждено в десятках исследований для различных акваторий Мирового океана. Например, модель SWAN была рекомендована решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологофизическим прогнозам от 25.05.2015 г. для численного прогноза параметров ветрового волнения и динамики вод в Невской губе, восточной части Финского залива<sup>1</sup>.

### **2.3. Рефракционно-дифракционная модель приближения пологих склонов HWAVE**

Модель HWAVE основана на гиперболической аппроксимации нестационарной формы уравнения пологих склонов (УПС). Модель учитывает дифракцию волны как вдоль ее фронта, так и вдоль направления ее распространения, по сравнению с параболической аппроксимацией и более эффективна по затратам процессорного вычислительного времени, чем эллиптическое приближение. Кроме того, модель HWAVE включает процесс диссипации волновой энергии в прибрежной зоне с пористыми волноломами. Для решения нестационарного уравнения гиперболической аппроксимации был использован метод псевдопоток. Верификация модели для монохроматических волн была проведена на данных лабораторных экспериментов, а также на данных физического моделирования вдольбереговых течений морской части притока «Быстрый» дельты Дуная.

Модель позволяет проводить расчеты волнового режима прибрежной зоны или огражденной морской акватории на основе численного решения УПС в гиперболическом приближении. Преимуществом модели перед SWAN является более точное описание эффектов отражения волн, рефракции и дифракции на неоднородностях донного рельефа и оголовках молв и других ГТС, поэтому ее применение целесообразно в прибрежной зоне с инженерными сооружениями.

Примеры успешного тестирования модели по данным лабораторных экспериментов представлены в публикациях авторов — разработчиков модели. Модель использовалась в большом числе проектов по береговой инженерии как разработчиками модели, так и американской компанией «Coastal Harbor Engineering» в проектах в США и других странах.

### **2.4. Полуспектральная модель HWAVE-S**

Модель HWAVE-S является полуспектральной версией монохроматической модели HWAVE. Модели такого класса основаны на предположении нерегулярных ветровых волн в виде линейной суперпозиции бесконечного числа гармонических волн, распространяющихся независимо. К подобным моделям также относятся модели REF/DIF-S, CGWAVE, ARTEMIS [5–7]. HWAVE-S позволяет моделировать рефракционно-дифракционную трансформацию спектра ветрового волнения у ГТС.

### **2.5. Рефракционно-дифракционная модель ARTEMIS**

Модель ARTEMIS [5–7], как и модель HWAVE, основана на УПС. Модель описывает трансформацию волн в прибрежной зоне с учетом рефракционно-дифракционных процессов, диссипации за счет трения о дно и разрушения волн. Эллиптические УПС решаются численно методом конечных элементов. Модель представлена в открытом доступе на сайте моделирующего комплекса TELEMAC.

ARTEMIS — часть TELEMAC-MASCARET для моделирования течений со свободной поверхностью<sup>2</sup>. ARTEMIS предназначен для моделирования волн непосредственно в прибрежной зоне и

<sup>1</sup> URL: <http://method.meteorf.ru/cmkp/may15.html>

<sup>2</sup> URL: <http://www.opentelemac.org>

в портах<sup>3</sup>, где важны явления рефракции, дифракции, отражения волн и где спектральные модели работают плохо. НИУ МГСУ имеет опыт использования связки этих моделей во многих ответственных инженерных проектах.

## 2.6. Программный комплекс MIKE 21

MIKE21 — это обширная и всесторонняя моделирующая система, разработанная в датском институте «Danish Hydraulic Institute Water&Environment» и предназначенная для двумерных гидродинамических расчетов. 2D-модуль носит классическое имя линейки продуктов: MIKE 21 с добавлением аббревиатуры «FM», которая обозначает тип модельной сетки — «Flexible Mesh», т.е. нерегулярная расчетная сетка [8]. Нерегулярная сетка обладает оптимальной пластичностью в представлении сложных геометрических форм и обеспечивает плавную правдоподобную передачу границ в модели. Для территорий, где необходима высокая детализация, применяются малые ячейки расчетной сетки. Крупные ячейки используются там, где допустима упрощенная детализация, что позволяет оптимизировать работу оперативной памяти компьютера для ускорения расчетов [8]. Пространственное разрешение для основных расчетных уравнений проводится по принципу конечных объемов по центрам ячеек. В горизонтальной плоскости применяется нерегулярная расчетная сетка, а в вертикальном домене — регулярная (их сочетание передает поверхность в 3D-разрешении) [8].

---

<sup>3</sup> URL: <http://www.opentelemac.org/index.php/modules-list/19-artemis-presentation>

### 3. ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН НАТУРНЫМИ И ЛАБОРАТОРНЫМИ ДАННЫМИ

#### 3.1. Верификация ветроволновой модели по данным натурных наблюдений

При верификации моделей сопоставление результатов расчетов с данными измерений проводится на основе как графического сравнения кривых временных разверток анализируемых параметров, так и в виде результатов статистической обработки, с построением регрессионных связей между измеренными и рассчитанными характеристиками волн и течений. Цель данных мероприятий состоит в оценке корректности результатов, получаемых при расчетах с использованием численных моделей.

В качестве примера можно рассмотреть верификацию модели SWAN для района проектирования порта Сабетта-Утренний, расположенного в Обской губе Карского моря. Расчеты ветроволновой модели сравнивались с данными натурных наблюдений.

Ветровое волнение было рассчитано на треугольной сетке (рис. 3.1, 3.2), покрывающей акваторию Карского моря. Сетка состоит из 108 027 элементов и 56 712 узлов. На рис. 3.3 показано местоположение метеостанции Сеяха. Сравнение рассчитанных полей ветра было выполнено именно для этой станции ввиду ее близкого расположения к площадке проектирования. Для волноизмерительных биев 1 и 2 в районе порта (рис. 3.4) были доступны для сравнений данные по средней высоте волн и по среднему периоду волн.

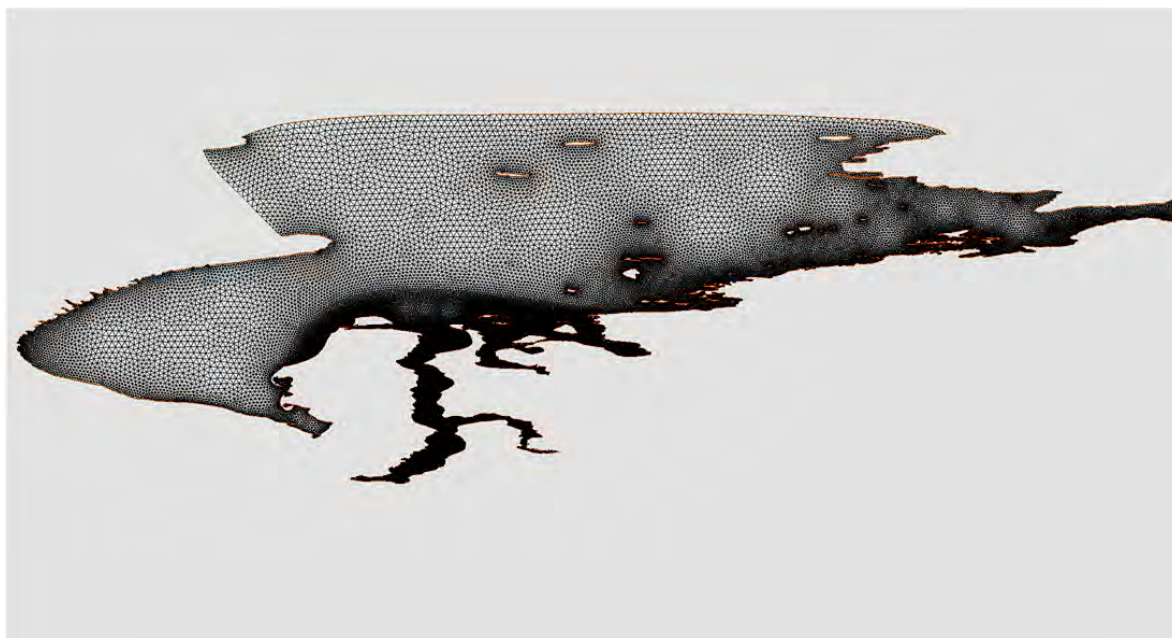


Рис. 3.1. Треугольная неструктурированная сетка Карского моря для расчета ветрового волнения



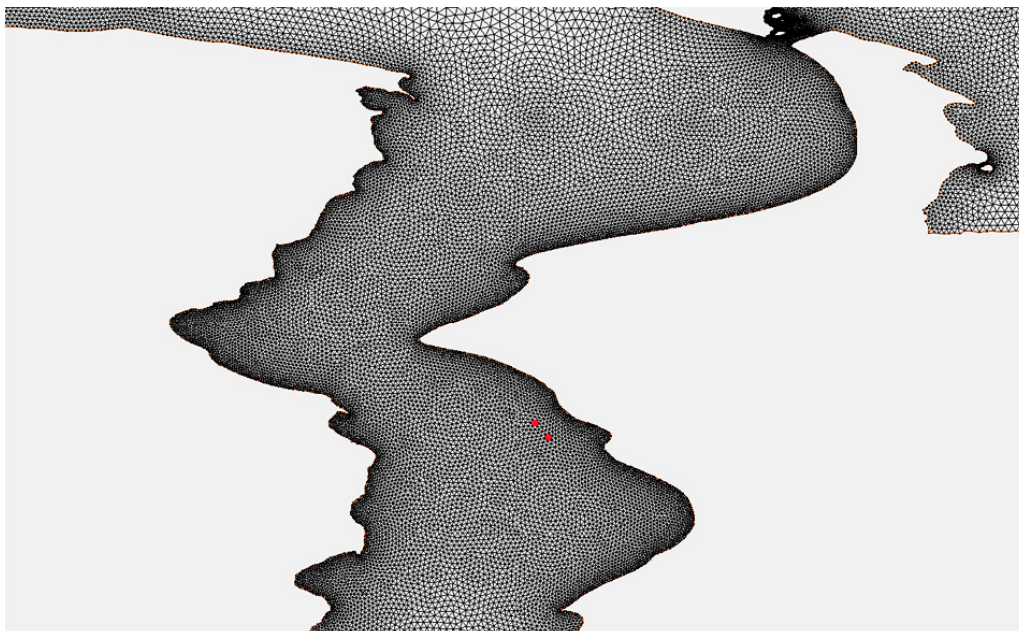


Рис. 3.2. Фрагмент расчетной сетки в районе Обской губы (красные точки показывают положение волноизмерительных буйев вблизи проектируемого порта)

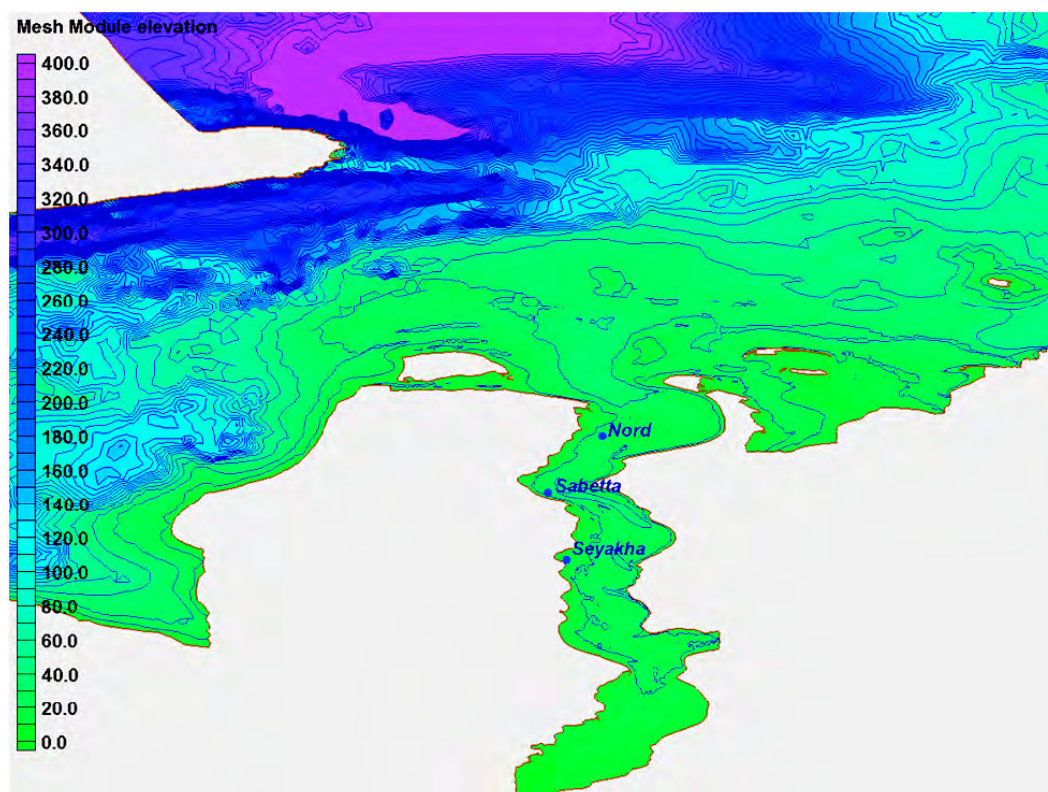


Рис. 3.3. Карта глубин и расположение волноизмерительных станций Норд и Сабетта и метеостанции Сеяха

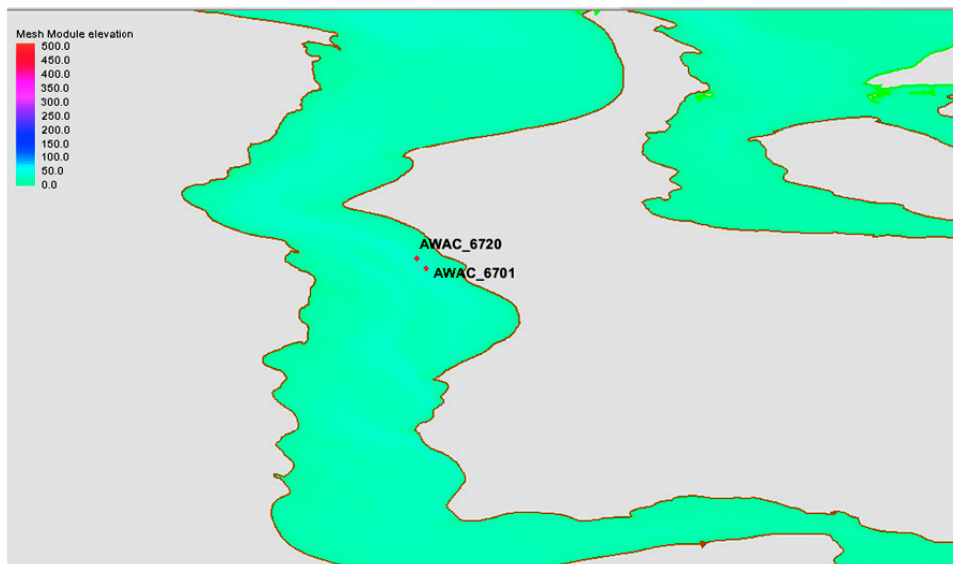


Рис. 3.4. Расположение в Обской губе волноизмерительных буйв 1 и 2

Сопоставление измеренных глубин в точках измерений с глубинами, интерполированными в точки измерений с батиметрических карт, используемых в модели SWAN, представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Глубины в точках измерений**

Точка	Глубина в точке измерений на батиметрической карте модели SWAN, м	Глубина в месте измерений, м
1	22,4	22
2	23,25	22

**Сравнение результатов реанализа поля ветра с данными измерений на станции Сеяха**

Данные системы глобального реанализа метеополей CFSv2, интерполированные в точку расположения метеостанции Сеяха, сопоставлены с данными этой метеостанции (рис. 3.5). Проведен статистический регрессионный анализ связи рассчитанных и измеренных компонент скорости ветра (рис. 3.6, 3.7, табл. 3.2).

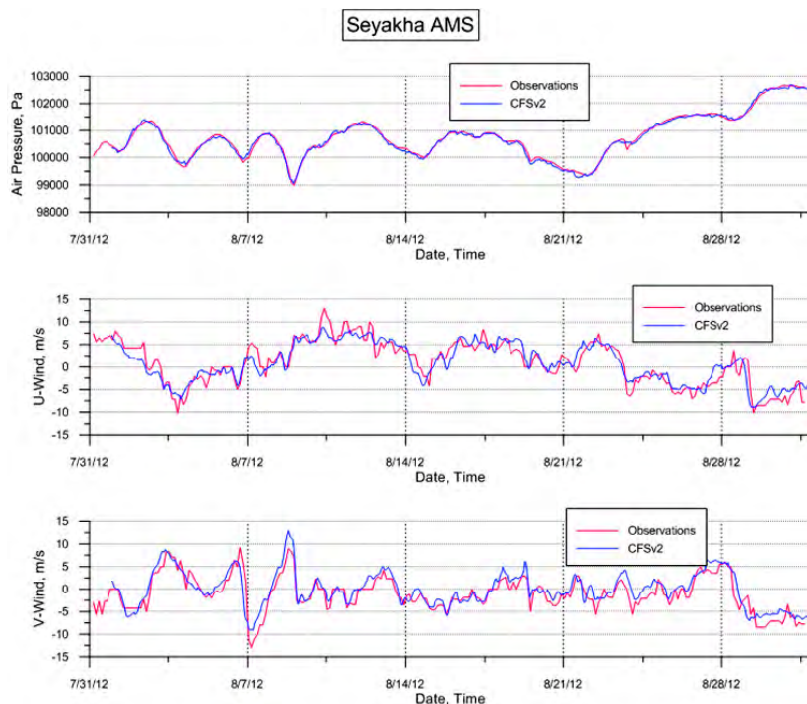


Рис. 3.5. Атмосферное давление, приведенное к уровню моря, зональная и меридиональная компоненты скорости ветра на высоте 10 м, измеренные на метеостанции Сеяха (красные кривые) за 31.07.2012–01.09.2012 и интерполированные из данных глобальной системы метеопрогноза CFSv2 (синие кривые) в точку с координатами станции

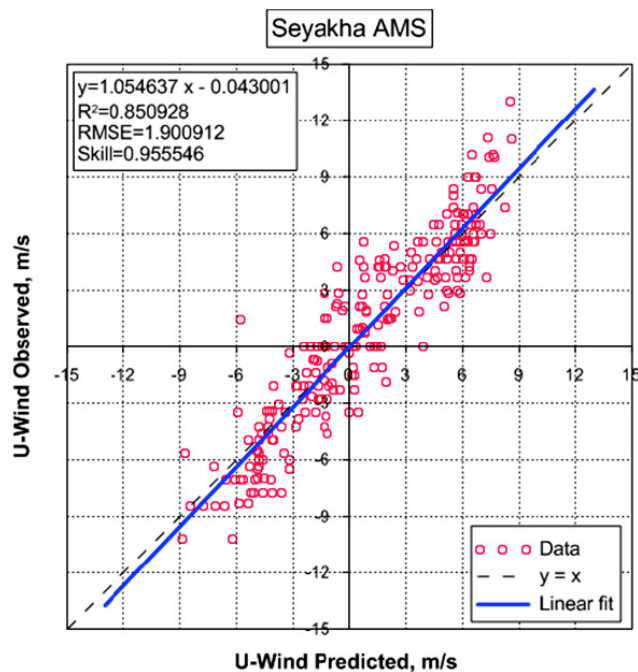


Рис. 3.6. Сравнение зональной компоненты скорости ветра на высоте 10 м, измеренной на метеостанции Сеяха в период 31.07.2012–01.09.2012 и интерполированной из данных глобальной системы метеопрогноза CFSv2 в точку с координатами станции

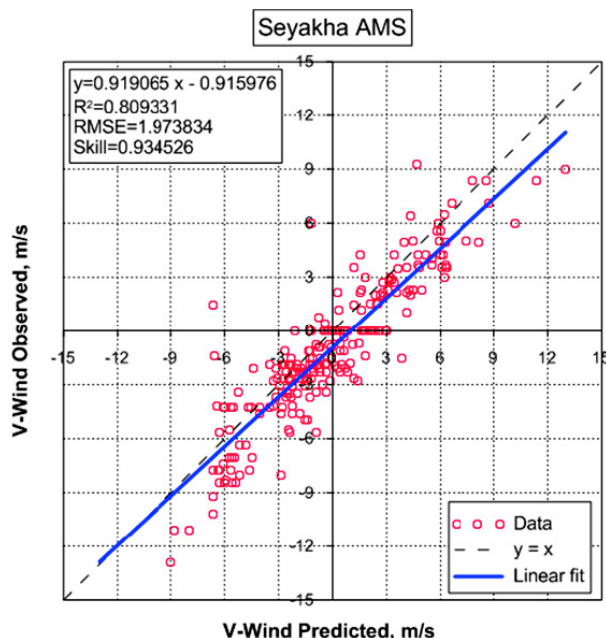


Рис. 3.7. Сравнение меридиональной компоненты скорости ветра на высоте 10 м, измеренной на метеостанции Сеяха в период 31.07.2012–01.09.2012 и интерполированной из данных глобальной системы метеопрогноза CFS в точку с координатами станции

Таблица 3.2

**Статистическая оценка качества данных глобальной системы метеопрогноза CFSv2 в сравнении с измерениями скорости ветра на метеостанции Сеяха за 31.07.2012–01.09.2012**

Компоненты скорости ветра	Диапазон изменения, м/с	Среднеквадратичное отклонение, м/с	Коэффициент корреляции $R$	Индекс предсказательной способности $Skill$
Зональная компонента	23,16	1,90	0,92	0,96
Меридиональная компонента	22,17	1,97	0,90	0,93

Кроме среднеквадратичного отклонения и коэффициента корреляции для оценки эффективности модели использовался индекс предсказательной способности модели согласно предложенному С.С. Willmott методу, широко используемому для верификации океанографических моделей:

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |X_{i,model} - X_{i,obs}|^2}{\sum_{i=1}^N (|X_{i,model} - \overline{X_{i,obs}}| + |X_{i,obs} - \overline{X_{i,obs}}|)^2} \quad (3.1)$$

Максимальное значение индекса Skill (абсолютная предсказательная способность модели) равна единице.

Представленные на рис. 3.5 результаты показывают, что данные реанализа давления и компонент скорости ветра хорошо описывают измеренное давление и компоненты скорости ветра на станции Сеяха. Такая оценка графического сопоставления результатов реанализа и данных измерений подтверждается результатами статистического анализа (рис. 3.6, 3.7, табл. 3.2). Среднеквадратичная ошибка менее 2 м/с, коэффициент корреляции более 0,9 и высокие значения индекса предсказательной способности (более 0,93) подтверждают вывод, сделанный выше на основе графического сопоставления результатов реанализа и измеренных данных. Отметим также, что для модуля скорости ветра сопоставление данных реанализа дает меньшие значения параметров статистической связи по сравнению с анализом для компонент скорости. Однако именно значения компонент скорости ветра используются как входные данные для расчета ветровых волн в модели SWAN, поэтому данные рис. 3.6, 3.7 и табл. 3.2 показывают обоснованность использования данных реанализа CFSv2 для расчета волновых полей на подходе к проектируемому порту.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)