

Соэ Моэ Лвин

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ВИРТУАЛЬНОГО ПОЛИГОНА  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ В  
ГЕТЕРОГЕННОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ ОКРУЖЕНИИ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ  
(технические науки)

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете «СПбГМТУ»

**Научный руководитель –**

доктор технических наук, доцент Дегтярев Александр Борисович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор Геппенер Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент Холкин Владимир Юрьевич

**Ведущее предприятие –** ООО «Геолинк Текнолоджис»,

г. Санкт-Петербург, Россия

Защита диссертации состоится «8» июня 2011г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских и  
кандидатских диссертаций, к.т.н.

Н.Л. Щеголева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящий момент возникла необходимость интеграции информационных технологий, как в сфере непосредственного анализа сложных ситуаций, так и синтеза моделей для воспроизведения ситуаций при принятии управленческих решений. В настоящем исследовании эта интеграция конкретизируется в направлении создания комплексных систем моделирования разнородных природных и техногенных процессов типа «виртуальный полигон».

Появление концепции «виртуального полигона» связано с необходимостью рассмотрения все более сложных моделей для исследования поведения динамических объектов, требующих применения высокопроизводительной вычислительной техники. В настоящее время применение такого рода вычислительных инструментов требует от исследователя большего знания особенностей современных вычислительных технологий. Во многом этот факт становится препятствием на пути их внедрения, и как следствие, причиной снижения эффективности исследований в различных предметных областях. Сильный разрыв между высоким уровнем «железа» и низким уровнем его применения привел к появлению новой концепции использования информационных технологий. Теперь пользователь ожидает от вычислительной техники не доступа к ресурсам, предоставления процессорного времени, оперативной памяти или средств хранения, а определенной услуги в рамках выполнения его предметного задания. Этот новый взгляд изменил также подход в области разработки программного обеспечения, перенеся упор на создание промежуточного программного обеспечения, отрывающего приложение пользователя от тех ресурсов, на которых оно выполняется. За последние 5 лет этот взгляд изменил и направление развития Grid технологий, введя понятие сервис ориентированного Grid.

В диссертации рассматриваются элементы виртуального полигона как сервисы для исследования морской среды. В качестве элементов морской среды рассматриваются ветер, волны и другие факторы. При этом основное внимание обращено на создание элементов виртуального полигона (сервисов), необходимых для моделирования поведения судна при интенсивных внешних возмущениях на основе модели авторегрессии. Эта модель наиболее актуальна при реализации виртуального полигона моделирования поведения динамических объектов и в инструментальных средствах тестирования бортовых корабельных интеллектуальных систем реального времени.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью реализации современной концепции информационных технологий, связанной с ориентацией на сервисы, при разработке и создании проблемно-ориентированной среды «виртуальный полигон» моделирования поведения сложных технических объектов в морских условиях.

**Целью работы** является разработка и исследование модели взаимодействия разноуровневых приложений виртуального полигона, обеспечивающей работу нескольких элементов виртуального полигона моделирования поведения морских объектов. Для достижения этих целей в диссертации решались следующие основные задачи:

- разработка и обоснование модели ветроволновых возмущений на основе принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде;
- разработка алгоритмов и программного комплекса функционирования виртуального полигона в части моделирования ветроволновых возмущений;
- генерация сценариев ветроволнового воздействия при различном уровне внешних возмущений;
- анализ альтернатив, выбор предпочтительной вычислительной технологии и оценка риска принимаемых решений при интеллектуальной поддержке оператора виртуального полигона в гетерогенной вычислительной среде.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе были использованы системный анализ, методы математического моделирования, методы вычислительной математики, теория вероятностей, случайных процессов и математическая статистика, линейная алгебра, а также методы прикладного программирования.

**Объект исследования.** Объектом исследования являются модели взаимодействия разноуровневых приложений виртуального полигона для генерации ветрового волнения, погодных сценариев и визуализации.

**Научную новизну** работы составляет:

- элемент виртуального полигона, позволяющий моделировать ветровое волнение в гетерогенной вычислительной среде;
- новый метод интеграции разноуровневых приложений на базе промежуточного программного обеспечения, предоставляемого платформой SGE;
- новые алгоритмы интегрированной работы приложений виртуального полигона в условиях распределенной вычислительной среды.

**Достоверность научных результатов и выводов** подтверждаются строгостью доказательства утверждений и наложенных ограничений, обоснованностью применения математического аппарата, оценкой адекватности математических моделей, результатами тестирования алгоритмов и программного обеспечения, а также практическим использованием разработанных математических, алгоритмических и программных методов и средств.

**Основные научные результаты.**

- разработана модель взаимодействия разноуровневых приложений виртуального полигона;
- адаптирована авторегрессионная модель волнения и численные методы ее реализации для работы в качестве элемента виртуального полигона моделирования поведения морских объектов в однородной и неоднородной вычислительных средах;

- реализованы элементы виртуального полигона: модель ветрового волнения на участке квазистациональности, синоптической изменчивости, промежуточное программное обеспечение для препроцессинга и постпроцессинга результатов;
- предложен алгоритм реализации сценариев волновой погоды и их визуализации в рамках виртуального полигона;
- проведено сравнение эффективности реализации изучаемых элементов виртуального полигона в однородной и неоднородной вычислительной среде на базе различных программных и технических средств (распараллеливание кода и распределение заданий).

**Практическая ценность** работы заключается в следующем:

- Модели генерации ветрового волнения в рамках работы многоуровневых приложений виртуального полигона.
- Программный комплекс, обеспечивающий работу нескольких элементов виртуального полигона моделирования поведения морских объектов.

Практическая значимость диссертационного исследования обеспечена прикладной направленностью и созданием конкретных методов, алгоритмов и программных средств для виртуального полигона моделирования поведения морских объектов в условиях распределенной вычислительной среды.

**Внедрение результатов работы:**

Разработанные методы, алгоритмы и программные средства внедрены в НПО «Полярная звезда» и используются в учебном процессе СПбГМТУ при проведении лабораторных и курсовых работ по курсу «Инженерия знаний» в рамках магистерской подготовки студентов специальности 220400 «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», «Архитектура высокопроизводительных компьютерных систем».

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на национальных и международных научно-технических конференциях: Международная конференция МОРИНТЕХ-юниор 2009, Санкт-Петербург, 2009; Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика-2009», Санкт-Петербург, 2009; Международная конференция «Computer Science & Information Technologies», Ереван, 2009; Международная конференция «Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education», Дубна, 2010; Международная конференция ICSSA2010, Янгон, Мьянма, 2010.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель ветрового волнения как компонент виртуального полигона.
2. Модель взаимодействия разноуровневых приложений в рамках виртуального полигона.
3. Программный комплекс, описывающий компоненты виртуального полигона.

## **Публикации**

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 7 статьях и докладах, из них по теме диссертации 7, среди которых 1 публикация в ведущем рецензируемом издании, рекомендованном в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 6 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях перечисленных в конце автореферата.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения, и практических рекомендаций. Она изложена на 130 страницах машинописного текста, включает 32 рисунков, 12 таблиц, 1 приложение и содержит список литературы из 175 наименований, среди которых 110 отечественных и 65 иностранных авторов.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации.

**Первая глава** содержит анализ особенностей организации виртуального полигона. Описаны особенности математических моделей внешней морской среды и поведения морских объектов, а также реализации разнородных математических моделей в многопроцессорной распределенной гетерогенной вычислительной среде.

Поведение плавучих объектов традиционно описывается в терминах моделей динамических систем со случайным входным сигналом и иногда случайными параметрами. Это наиболее удобная форма математического представления изучаемых в рамках виртуального полигона объектов. В тоже время, моделирование внешних воздействий в общем случае связано с решением системы нелинейных дифференциальных уравнений гидроаэродинамики и теплопереноса, описывающих процесс взаимодействия океан-атмосфера. Гидрометеорологические процессы, воздействующие на плавучий объект, обладают следующими характерными особенностями:

- многомерность и многогранность (скорость ветра и течений);
- полимодулированность (эволюция волнения в шторме и последовательности штормов);
- полицикличность (ритмика температур, приливных течений и т.п.);
- связность (зависимость интенсивности волнения от скорости ветра и т.п.).

Это приводит к необходимости совместного использования разнородных математических моделей и приложений. Часто сам характер этих приложений исключает возможность их совместного запуска в однородной вычислительной среде. В определенных ситуациях необходимо взаимодействие разных по сложности и природе вычислительных параллельных приложений, баз данных, ассимиляции информации, визуализации результатов и пр. Поэтому, в общем

случае, использование гетерогенной вычислительной среды оказывается не результатом научных экспериментов, а единственным возможным инструментом для реализации проблемно ориентированной среды.

Реальная проблема разнородных приложений виртуального полигона в условиях Grid среды заключается в том, чтобы сохранить высокий уровень параллельной эффективности. Для обеспечения эффективного использования сетевых ресурсов применяются специальные методы для распределения рабочей нагрузки. Надлежащие методы оптимизации рабочей нагрузки должны учитывать два аспекта:

- характеристики приложений (например, объем переданных данных между процессами, количество операций с плавающей точкой и памятью)
- характеристики ресурсов (например, потенциальные возможности процессоров, сети, памяти, а также уровень гетерогенности динамически выделенных ресурсов).

В главе дан аналитический обзор современного состояния проблемы разработки виртуального полигона моделирования окружающей среды в гетерогенном вычислительном окружении. Основное внимание при характеристике выполненных исследований обращается на принципы организации виртуального полигона, особенности моделирования сложных процессов, характеризующих окружающую среду его функционирования, а также организацию гетерогенного вычислительного окружения.

**Вторая глава** посвящена разработке концептуальной модели и принципов построения системы проблемно ориентированной среды. Рассмотрены принципы обработки информации в многопроцессорной среде, архитектура и особенности функционирования виртуального полигона. В качестве основных принципов, в первую очередь, отмечаются принцип конкуренции и формализации нечеткой информации. Их реализация дает возможность повысить эффективность функционирования «виртуального полигона». Концепция организации виртуального полигона, как сложной многоуровневой интеллектуальной системы, предполагает наличие следующих основных компонент:

- иерархии имитационных моделей, отражающих рассматриваемые проблемные области;
- аналитических моделей (иерархии аналитических моделей), дающих упрощенное (агрегированное) описание различных сторон моделируемых явлений;
- информационной подсистемы, включающей базу данных и знаний, основанную на методах и моделях искусственного интеллекта;
- системы управления и сопряжения, обеспечивающей взаимодействие всех компонент системы и работу с пользователем в режиме интерактивного диалога.

Общая схема «виртуального полигона» представлена на рис. 1

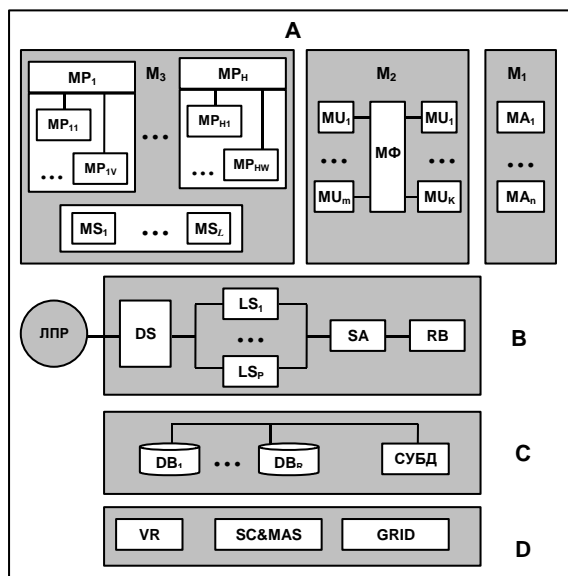


Рис.1. Структура виртуального полигона

На этом рисунке обозначены следующие блоки: А – модели; В – управление и интерпретация; С – информационное обеспечение; D – применяемые информационные технологии;  $M_1$  – модели оценки состояния динамических объектов, навигационной и оперативной обстановки;  $M_2$  – модели управления;  $M_3$  – планирование; DS – диалоговая система управления; SA – сценарии и адаптация; RB – практические рекомендации;  $DB_r$  ( $r=1, \dots, R$ ) – базы данных о состоянии виртуального полигона.

Предлагается создание интегрированной проблемно-ориентированной среды моделирования высокой степени адаптивности. В основу положена концепция, которая позволяет вовлекать в интегрированную среду моделирования дополнительные ресурсы. В их качестве могут выступать, как новые вычислительные мощности, так и разнородные элементы среды моделирования. Предлагаемый подход предусматривает комплексное решение проблемы, пригодное с одинаковых позиций для мониторинга и управления ДО, а также моделирования их поведения с учетом протекания всех сопутствующих природных и техногенных процессов. В качестве элементов для детальной разработки выбрано:

- математическое моделирование внешней среды (модели типа MA рис.1)
- хранение и визуализация данных «виртуального полигона» (элементы  $DB_r$  рис.1)

В главе также рассмотрены принципы построения сценариев и оценки эффективности интеграции приложений в виртуальном полигоне. Рассмотрены как чисто вычислительные и информационные аспекты, так и аспекты использования интеллектуальных технологий организации гетерогенной вычислительной среды.

**Третья глава** посвящена обсуждению вопросов моделирования ветроволновых воздействий в рамках виртуального полигона при создании иерархии разноуровневых приложений. В качестве моделей для реализации данного элемента виртуального полигона были рассмотрены два класса математических моделей: Лонге-Хиггинса и АРСС (авторегрессии и скользящего



среднего). Определены сферы приложения каждой из рассмотренных моделей. Показано, что, несмотря на высокий уровень аналитического представления, модель Лонге-Хиггинса оказывается не удобной для использования в качестве элемента виртуального полигона (в иерархии многоуровневых приложений) для воссоздания непрерывной реализации ветроволновых полей в реальном масштабе времени. Для практической реализации была выбрана наиболее удобная полевая авторегрессионная модель порядка  $(N_1, N_2, N_3)$ , дискретный аналог которой задается в виде

$$\zeta_{(x,y,t)} = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} \sum_{k=0}^{N_3} \Phi_{ijk} \zeta_{(x-i,y-j,t-k)} + \varepsilon_{(x,y,t)} \quad (1)$$

где  $\Phi_{ijk}$  - обобщенные параметры авторегрессии,  $\varepsilon_{(x,y,t)}$  - поле белого шума с гауссовым законом распределения. Процедура оценивания обобщенных параметров авторегрессии  $\Phi_{ijk}$  и дисперсии поля белого шума  $\sigma_\varepsilon^2$  строится на основе обобщенной системы уравнений Юла - Уокера:

$$K_\zeta(X, Y, \tau) = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} \sum_{k=0}^{N_3} \Phi_{ijk} K_\zeta(X - i\Delta_x, Y - j\Delta_y, \tau - k\Delta_t) \quad (2)$$

Здесь  $X=x_2-x_1$ ,  $Y=y_2-y_1$ ,  $\tau=t_2-t_1$ ;  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_t$  дискретизация по пространственным и временной переменным.

Дисперсия поля белого шума определяется из (2) при  $X, Y, \tau=0$ :

$$\sigma_\varepsilon^2 = D[\zeta] - \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_2} \sum_{k=0}^{N_3} \Phi_{ijk} K_\zeta(i\Delta_x, j\Delta_y, k\Delta_t) \quad (3)$$

Система уравнений (2) обладает блочно-теплицевой симметричной матрицей, что позволяет использовать для ее решения блочный метод Левинсона – Дербина. Для моделирования негауссовых случайных полей к вспомогательному полю  $\zeta_{(x,y,t)}$ , воспроизводимому по (1), применяется нелинейное безынерционное преобразование  $z_{(x,y,t)} = f(\zeta_{(x,y,t)})$ , определяемое на основании уравнения  $F(z) = \mathfrak{I}(\zeta)$ .

В итоге алгоритм моделирования стационарного пространственно-временного негауссова поля представляется последовательностью операций:

- определение корреляционной поверхности  $K(x,y,t)$ ; в этом случае можно или воспользоваться аналитической аппроксимацией поверхности (например, экспоненциально-косинусной), или оценить ее численно как Фурье-преобразование пространственно-временной спектральной плотности  $S(u, v, \omega)$ ; для полей волнового характера, обладающих дисперсионным соотношением  $\omega(u, v)$ , последняя операция еще более упрощается:

$$K_z(X, Y, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_z(u, v) \cos(Xu + Yv - \omega(u, v)\tau) dudv \quad (4)$$

- вычисление закона преобразования нормированного гауссова случайного

поля к случайному полю с произвольным законом распределения и оценивание его корреляционной поверхности;

- моделирование пространственно-временной реализации нормированного гауссова поля.

Для полноценного моделирования в рамках виртуального полигона на основе этой известной модели волнения необходима предварительная подготовка данных и создание соответствующих ветроволновых сценариев. Для этих целей была выбрана известная параметризация спектральной плотности волнения:

$$S(\omega, \beta) = m_{00} \sum_{p=1}^N \gamma_p S_p(\omega, \beta | \omega_{\max}, \beta_{\max}) \quad (5)$$

Здесь  $m_{00}$  – нулевой момент спектра (дисперсия взволнованной поверхности),  $\gamma_p$  – весовой вклад каждой волновой системы в общую энергию,  $\sum_{p=1}^N \gamma_p = 1$ .

А также параметризация штормов и окон погоды

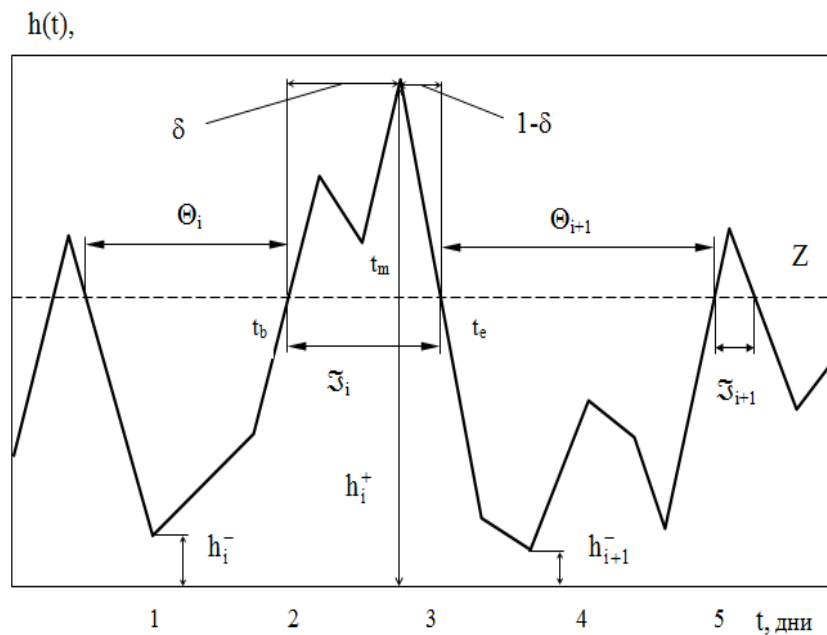


Рис.2. Параметризация штормов и окон погоды

В этом случае классификация штормов во временной области сокращается до анализа так называемых устойчивых состояний, определяющих продолжительность некоторого типа волнения. Тогда, в соответствии с общей концепцией виртуального полигона, в данном случае можно сформулировать различные сценарии: краткосрочный, «шторм», «миссия», «навигация» и т.д. Для создания такого сорта сценариев необходима исходная статистическая информация о ветроволновом режиме в заданном районе. Очевидно, получить ее, исходя исключительно из данных измерений, практически невозможно. В работе это предполагается сделать при помощи гидродинамических моделей волнения (6), достигших высоко уровня точности

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial N}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial N}{\partial k} \dot{k} + \frac{\partial N}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial N}{\partial \omega} \dot{\omega} = G_s \quad (6)$$

где  $N$  – спектральная плотность волнового действия является функцией от широты  $\varphi$ , долготы  $\theta$ , волнового числа  $k$  и угла  $\beta$  между направлением волнового вектора и параллелью, а также от частоты  $\omega$  и времени  $t$ .  $G_s$  – функция источника.

В качестве расчетной модели виртуального полигона используется программный комплекс Wave Watch III (WW на рис.3). Взаимодействие приложений указано на рис.3. В качестве интегрирующей среды в распределенном компьютерном окружении была использована среда Sun Grid Engine (SGE).

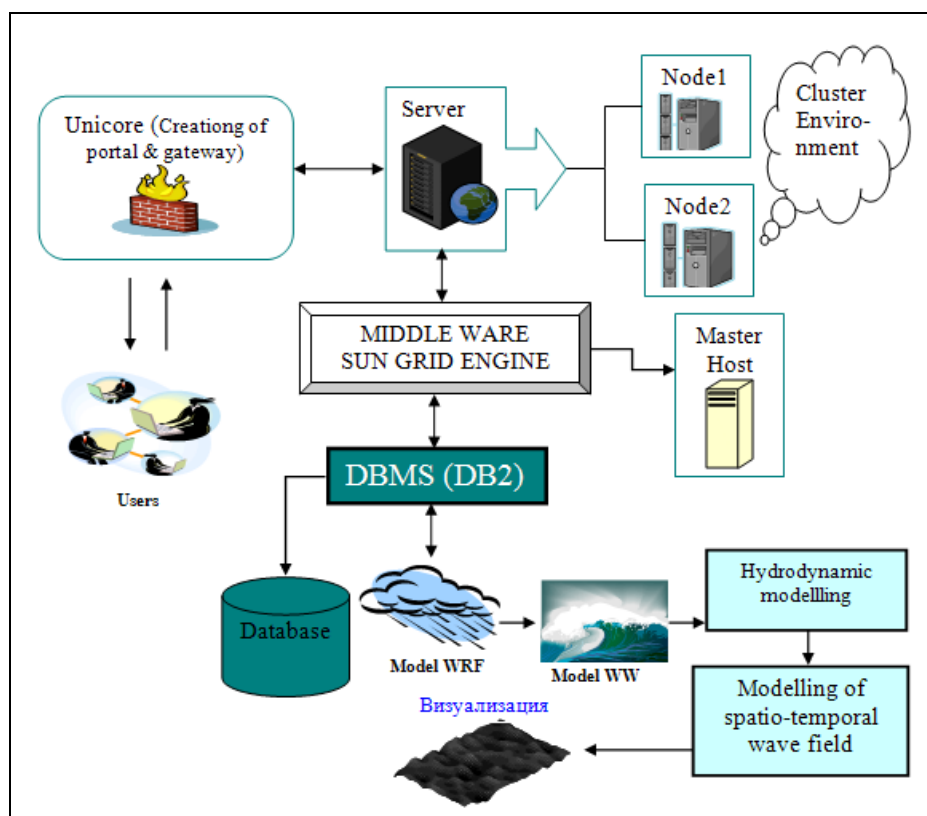


Рис.3. Взаимодействие сервисов при управлении данными в распределенном параллельном окружении на базе SGE

Таким образом, результаты работы модели Wave Watch III для конкретного региона используются в качестве исходных данных для построения вероятностных моделей генерации ветроволновых сценариев. Проблема взаимодействия гидродинамической и вероятностной модели заключается в принципиальной несовместимости по сложности и, как следствие, времени счета. Использование вероятностных моделей в рамках виртуального полигона как раз и обусловлено и простотой, и скоростью воспроизведения пространственно временных полей. Поэтому подготовка исходных данных при помощи гидродинамических моделей отделяется от непосредственного соприкосновения с вероятностными моделями ветроволновых сценариев путем предобработки результатов моделирования и накопления исходных данных в базе данных (DBMS(DB2) на рис.3)

**В четвертой главе** рассматривается структура программного комплекса, и организация элементов виртуального полигона в различных конфигурациях аппаратного обеспечения. Приведены результаты тестирования в однородных и неоднородных вычислительных средах. Коэффициенты авторегрессии (1),

необходимые для генерации ряда, можно получить из заданной автоковариационной функции, решив систему уравнений Юла-Уокера.

$$A\phi = b$$

$$a_{i,j} = \gamma_{|x(i)-x(j)|,|y(i)-y(j)|,|t(i)-t(j)|}$$

$$b_i = \gamma_{x(i),y(i),t(i)},$$

$$x(i) = \text{mod}((i+1) / (p_1 p_2), p_1)$$

$$y(i) = \text{mod}((i+1) / p_3, p_2)$$

$$t(i) = \text{mod}(i+1, p_3)$$

(7)

Выше приведены формулы системы уравнений Юла-Уокера для трехмерной задачи, где  $\gamma_{i,j,k}$  – дискретные значения автоковариационной функции. Используем параллельный алгоритм для воспроизведения стационарного случайного процесса морского волнения. При его построении использовано свойство процессов авторегрессии, заключающееся в их локальной стационарности (или однородности). Она заключается в том, что значение  $\zeta_t$  статистически связано только с  $n$  предыдущими отсчетами  $\zeta_{t-i}, i=1, \dots, n$ . Общее значение параметра  $n$  определяется интервалом корреляции данных. Следствием такой модели является то, что два фрагмента  $\zeta_t$ , разделенные интервалом более, чем в  $n$  отсчетов, можно рассматривать независимо рис.4.

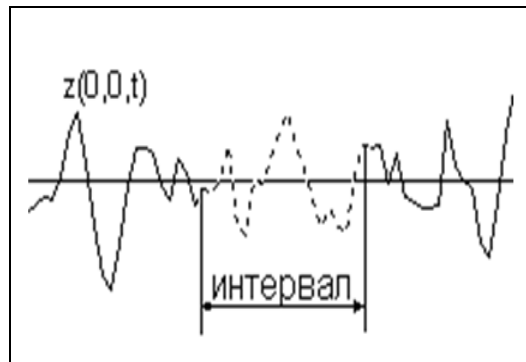


Рис.4. Соединение частей реализации по двухсторонней авторегрессионной зависимости

Эти математические особенности трансформации модели АРСС в параллельной вычислительной среде приводят к разбиению кусков реализации методом, показанным на рис.5.



Рис.5. Волновая поверхность в памяти устройства

Помимо коэффициентов для создания волновой поверхности одной из важных составляющих алгоритма является генерация нормально распределенной случайной величины (белый шум). В качестве метода в работе использована параллельная реализация Вихря Мерсенна (Mersenne Twister). Алгоритм запускает в каждом потоке отдельный генератор с уникальными параметрами, задающимися специальной подпрограммой `dcmt`. Это позволяет минимизировать коррелированность между последовательностями чисел этих генераторов.

Создание волновой поверхности происходит в несколько этапов. На первом этапе генерируется реализация заведомо большего размера, разделенная на независимые части для каждого потока. В начале каждой части находится промежуток разгона алгоритма, на котором для генерации величин используются не все коэффициенты авторегрессии. Эти участки удаляются из реализации, оставляя несвязанные части. Алгоритм завершается соединением этих частей по двухсторонней авторегрессионной зависимости (интервал между ними изначально заполнен нулями). Такая процедура именуется сшиванием.

$$\begin{aligned}
 Z_{x,y,t} = & \sum_{i=0}^{p_1} \sum_{j=0}^{p_2} \sum_{k=0}^{p_3} \varphi_{i,j,k} \cdot Z_{x-i,y-j,t-k} \\
 & + \sum_{i=0}^{p_1} \sum_{j=0}^{p_2} \sum_{k=0}^{p_3} \varphi_{i,j,k} \cdot Z_{x+i,y+j,t+k} + \varepsilon_{x,y,t}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Алгоритм реализован при помощи различных средств распараллеливания: OpenCL (с использованием GPU), MPI, OpenMP. Особенность реализации на MPI заключается в том, что каждый процесс генерирует отдельную часть временного ряда. Затем каждому процессу передается небольшой участок предыдущей части, достаточный для их сшивания. Далее части соединяются и посылаются на одно устройство для проверки результата. Алгоритм работает тем быстрее, чем больше процессов участвуют в работе.

В результате анализа целого ряда возможных комбинаций вычислительных платформ и промежуточного программного обеспечения были созданы следующие программы:

- программы под MPI и OpenCL для генерации волновой поверхности (autoreg);
- программа для визуализации волнения на OpenGL (visual);
- промежуточное программное обеспечение Sun Grid Engine (SGE) для интеграции различных приложений моделирования и визуализации.

Схема такой интеграции приложений показана на рис.6.



Рис.6. Схема интеграции приложений в распределенной вычислительной среды

Программа в качестве входных параметров принимает размер волновой поверхности. После окончания работы на стандартном выводе можно получить саму волновую поверхность. Такой комплекс программ обеспечивает генерацию волновой поверхности, гибкую настройку ее параметров и контроль за ее характеристиками. Схема такого комплекса показана на рис.7.

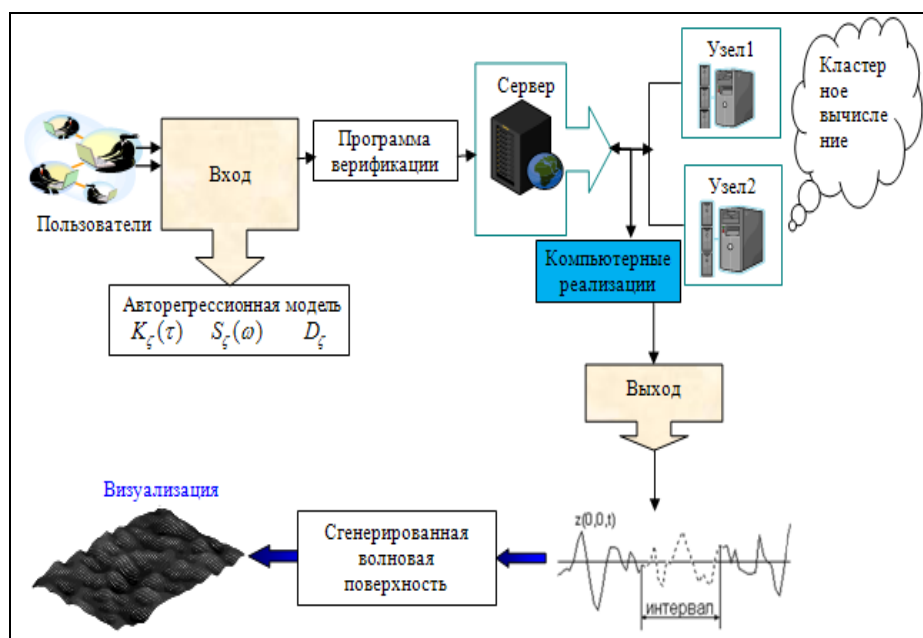


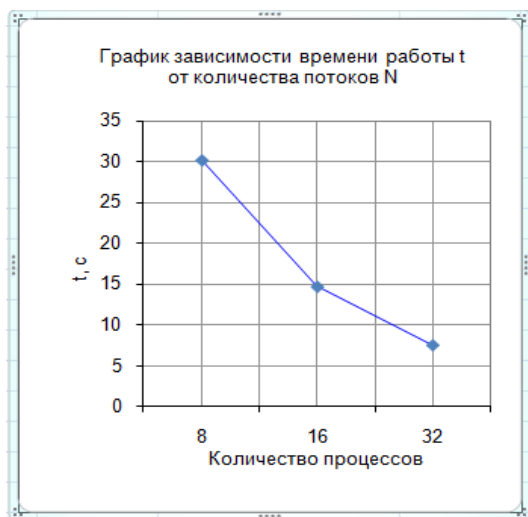
Рис.7. Взаимодействие сервисов при управлении данными в распределенном и параллельном компьютерном окружении

Для проведения экспериментальных исследований были созданы специализированные стенды, с помощью которых изучились однородные и неоднородные распределенные вычислительные среды. В качестве однородной

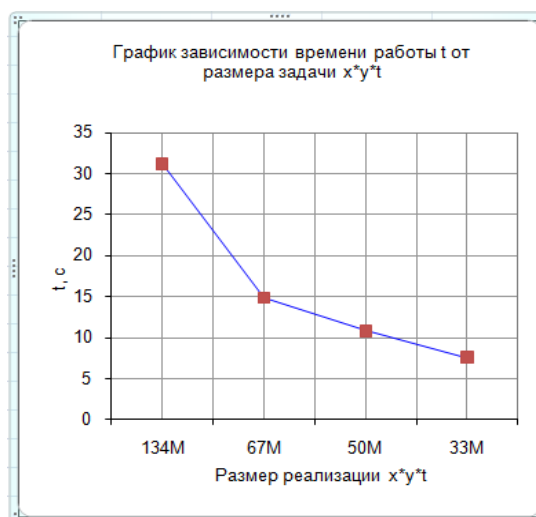
распределенной вычислительной среды был использован кластер Beowulf, состоящий из 10 узлов. Кластер на базе процессоров AMD Opteron. Доменное имя: eso.armath.spbu.ru. Результаты тестирования и их трактовка представлены ниже в табл.1 и на рис.8.

Таблица 1. Сравнение эффективности вариантов генерации волновой поверхности при помощи MPI для гомогенной распределенной вычислительной среды.  $N$  – количество частей,  $Z_1$  – размер реализации,  $Z_2$  – размер реализации вместе с участками разгона,  $P_1$  – размер части,  $P_2$  – размер части с разгоном,  $I$  – размер интервала,  $t$  – время работы программ.

Номер	N	$Z_1$			$Z_2$			$P_1$	$P_2$	I	t, c
		x	y	t	x	y	t				
1	8	64	64	1536	128	128	2048	256	192	96	30,24
2	16	64	64	1536	128	128	2048	128	96	48	14,75
3	32	64	64	1536	128	128	2048	64	48	24	7,60
4	32	64	64	2304	128	128	3072	96	72	36	10,83
5	32	64	64	3072	128	128	4096	128	96	48	14,84
6	32	128	128	1536	256	256	2048	64	48	24	31,21



А



В

Рис.8. График зависимости времени работы  $t$  от количества потоков  $N$  (А) и График зависимости времени работы  $t$  от размера задачи  $x*y*t$  (В)

В качестве неоднородной распределенной вычислительной среды был использован вычислительный кластер, состоящий из 8 узлов. Кластер на базе процессоров Intel Xeon. Неоднородность кластера определялась гетерогенностью коммуникационной среды. Результаты тестирования и их трактовка представлены ниже в табл.2 и на рис.9.

Таблица 2. Эффективность распараллеливания программы под MPI. Обозначения те же, что в таблице 1.

Номер	N	Z <sub>1</sub>			Z <sub>2</sub>			P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	I	t, с
		x	y	t	x	y	t				
1	8	64	64	1536	128	128	2048	256	192	96	9,04
2	16	64	64	1536	128	128	2048	128	96	48	4,71
3	32	64	64	1536	128	128	2048	64	48	24	2,90
4	32	64	64	2304	128	128	3072	96	72	36	4,30
5	32	64	64	3072	128	128	4096	128	96	48	6,50
6	32	128	128	1536	256	256	2048	64	48	24	12,70

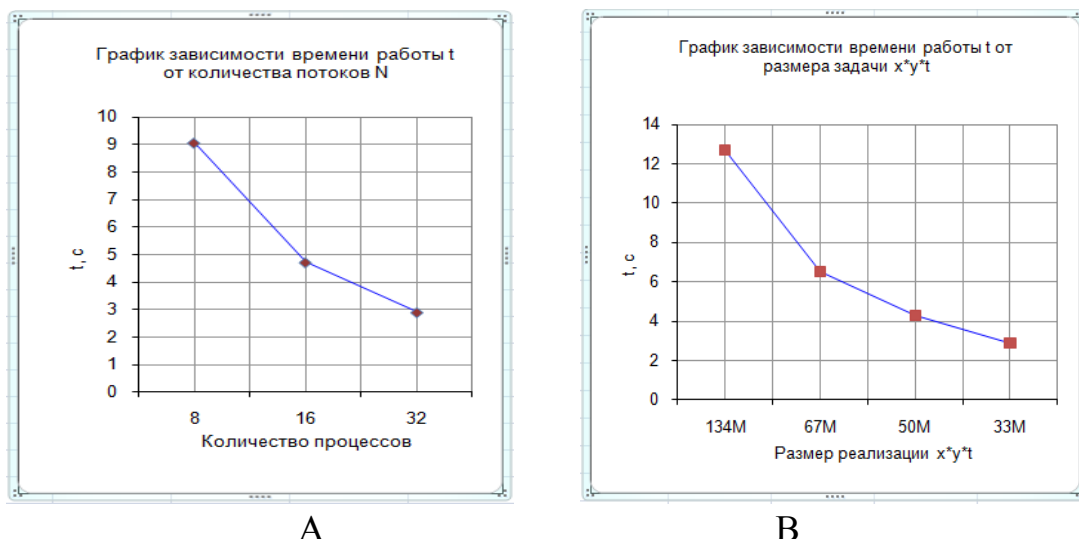


Рис.9. График зависимости времени работы  $t$  от количества потоков  $N$  (А) и График зависимости времени работы  $t$  от размера задачи  $x*y*t$  (В)

Для сравнения скорости работы программ на MPI и OpenCL были выбраны устройства со схожими характеристиками и стоимостью. Программа на базе OpenCL тестировалась на видеокарте с 112 потоковыми процессорами с частотой 1,5 ГГц, позволяющая запускать около 10 тыс. потоков одновременно. Программа MPI тестировалась на 2-узловом кластере. Результаты сравнения представлены ниже в табл.3.

Таблица 3. Сравнение эффективности вариантов генерации волновой поверхности при помощи технологии OpenCL и MPI.  $N$  – количество частей,  $Z_1$  – размер реализации,  $Z_2$  – размер реализации вместе с участками разгона,  $P_1$  – размер части,  $P_2$  – размер части с разгоном,  $I$  – размер интервала,  $t_{OCL}$  и  $t_{MPI}$  – время работы программ.



Номер	N	Z <sub>1</sub>			Z <sub>2</sub>			P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	I	t <sub>OCL, c</sub>	t <sub>MPI, c</sub>
		x	y	t	x	y	t					
1	6	32	32	768	64	64	1020	128	170	64	18,46	2,10
2	12	32	32	768	64	64	1020	64	85	32	15,29	1,52
3	24	32	32	768	64	64	1008	32	42	16	10,47	0,72
4	48	32	32	1536	64	64	1536	32	32	16	11,46	0,73
5	12	32	32	384	64	64	768	32	64	16	10,15	1,06
6	12	16	16	384	32	32	768	32	64	16	2,28	0,15
7	12	32	32	768	32	32	768	64	64	16	2,27	0,14
8	24	32	32	768	32	32	768	32	32	16	1,58	0,15

Несмотря на превосходство видеокарты по вычислительной мощности, алгоритм генерации временного ряда на MPI работает эффективнее алгоритма на видеокарте. OpenCL предоставляет весьма скудные средства синхронизации, даже с тонкой настройкой эффективно использовать все доступные потоки устройства проблематично. Преимуществом OpenCL можно было бы считать использование единой памяти для расчетов и визуализации, но при большой нагрузке на устройство графические средства видеокарты отключаются, и картинка на экране останавливается (рис.10).

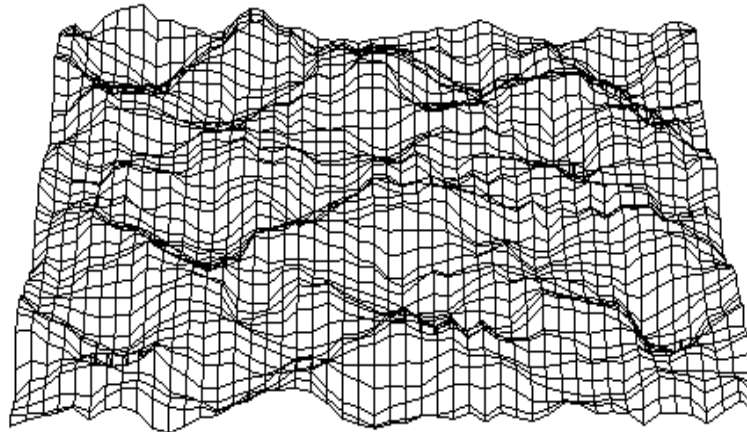


Рис.10. Сгенерированное волнение

Использование MPI дает выигрыш в производительности и максимальном размере реализации, но визуализация влечет за собой накладные расходы на пересылку данных устройству. OpenCL же при малом количестве данных позволяет отображать ход решения в реальном времени. Таким образом, использование того или иного подхода для моделирования волновой поверхности зависит от размера задачи и целей работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Рассмотрены различные модели ветроволновой среды: модели для интервала квазистационарности, синоптической изменчивости, штормов и окон погоды. Реализована генерация волновой поверхности как компонента виртуального полигона на основе математической модели авторегрессии. Суперпозиция моделей разной временной изменчивости использована для построения сценариев волновой погоды в рамках виртуального полигона.
2. Построена иерархия приложений разной степени сложности в рамках виртуального полигона. В качестве промежуточного программного обеспечения для связи разнородных приложений использован инструментарий Sun Grid Engine. В качестве самих приложений рассмотрены программы, обеспечивающие препроцессинг, необходимый для подготовки волновых погодных сценариев (программный комплекс гидродинамического моделирования морского волнения в спектральной форме – WWIII совместно с хранением информации в БД), собственно процессинг (собственный программный комплекс генерации ветрового волнения) и постпроцессинг (визуализация результатов на базе пакета Gnuplot).
3. Созданный комплекс программ для моделирования волновой поверхности предоставляет гибкие средства настройки, контроля параметров реализации и визуальную проверку полученных результатов посредством диаграмм и трехмерного отображения волнения. Критические функции программ распараллелены, обеспечивая тем самым удовлетворительное время работы. Повышение эффективности работы программ генерации волновой поверхности достигается за счет применения различных интерфейсов параллельного программирования (MPI, OpenMP, OpenCL) при использовании различных/разнородных вычислительных средств (кластер, SMP/многоядерная система, ускоритель на видеокарте) соответственно.

Таким образом, в настоящем исследовании предлагается новый путь создания элементов виртуального полигона, отвечающих за генерацию волновой поверхности в распределенной вычислительной среде. Материалы проведенного исследования могут быть использованы для воссоздания непрерывных реализаций морского волнения в составе виртуального полигона.

**Опубликованные научные работы по теме диссертации  
в изданиях, определенных ВАК:**

1. Дегтярев А.Б., Соз Моэ Лвин, Ганкевич И.Г., Сравнение эффективности применения MPI и OPENCL для генерации волновой поверхности [Текст] // Морские Интеллектуальные Технологии, 2010, № 4. с. 10–13

**и в других изданиях:**

2. Богданов А.В., Дегтярев А.Б., Соз Моэ Лвин. Проблемы создания комплекса многоуровневых приложений в распределенной среде [Текст] // Санкт-Петербург,

22-25 июня 2009 г. XVI Всероссийская научно-методическая конференция "Телематика'2009", с.427-428.

3. Соэ Моэ Лвин. Разработка элементов виртуального полигона для моделирования морской среды в распределенном компьютерном окружении [Текст] // Сборник докладов 5-я Общероссийская конференция молодых и специалистов по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех-юниор 2009». Санкт-Петербург. 10-12 ноября 2009 г. с.85-87.

4. Alexander Bogdanov, Lu Moe Khaing, Soe Moe Lwin. Deployment the testbed for Grid products testing on the base of Sun Grid Engine [Текст] (Создание полигона для тестирования Grid-продуктов на базе Sun Grid Engine) // Proceedings of International Conference «Computer Science & Information Technologies», 28 September - 2 October, 2009, Yerevan, Armenia, pp.394-396.

5. Alexander B. Degtyarev, Soe Moe Lwin. Development of virtual polygon elements for marine environment modeling in a distributed computer system [Текст] (Разработка элементов виртуального полигона для моделирования морской среды в распределенной вычислительной системе) // ICCA2010 Proceeding of the 8th International Conference on Computer Application, March 4 th to 5th; Yangon; Myanmar, pp.251-258.

6. A.V. Bogdanov , A.B. Degtyarev , Soe Moe Lwin , Thurein Kyaw Lwin. Problems of Development of Complex Multi-layered Applications in Distributed Environment [Текст] (Проблемы создания комплекса разноуровневых приложений в распределенной вычислительной среде) // Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education: Proceedings of the 4th Intern. Conf. (Dubna, June28-July 3, 2010). –Dubna: JINR, -p.51-57

7. A.V. Bogdanov , Thurein Kyaw Lwin , A. Shuvalov , Soe Moe Lwin. Unconventional Use of Distributed Databases from Server Consolidation to Consolidation Resources [Текст] (Нестандартное использование распределенных баз данных с сервера консолидации к консолидации ресурсов) // Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education: Proceedings of the 4th Intern. Conf. (Dubna, June28-July 3, 2010). –Dubna: JINR, -p.75-81