



## СОДЕРЖАНИЕ

### Статьи

<i>Каган Б.А., Тимофеев А.А.</i> Моделирование поверхностного и внутреннего $K_1$ (деклинационных) приливов в Белом море .....	4
<i>Владиминова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Литвин А.Д., Скопин Н.А.</i> Исследование течений в верхнем слое Черного моря в диапазоне мезомасштабов .....	19
<i>Тюгин Д.Ю., Куркина О.Е., Куркин А.А.</i> Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане .....	32
<i>Семёнов Е.В., Мортиков Е.В.</i> Методы обработки глубоководных термохалинных измерений .....	45
<i>Зимин А.В., Солощук П.В., Исаев А.В.</i> Особенности течений в восточной части Финского залива по результатам инструментальных измерений в июле 2010 года .....	58
<i>Диденкулова И., Вишка М., Куренной Д.</i> Изменчивость берегового профиля под совместным воздействием судовых и ветровых волн .....	66
<i>Сухоруков А.Л.</i> Применение метода статистических испытаний в задаче о подъеме груза с большой глубины в условиях нерегулярного волнения моря .....	79
<b>Конференции</b> .....	100
<b>Хроника</b> .....	102
Правила представления материалов в редакцию.....	103

# CONTENTS

## Articles

- Kagan B.A., Timofeev A.A.* Modelling of the  $K_1$  Surface and Internal Tides in the White Sea 4

On the basis of the use of hydrodynamic equations to incompressible liquid, reduced to non-dimensional form within the framework of similarity law, probabilistic structure of the field is constructed and researched as the basis of the decision of the problem of the non-dimensional parameter estimation of the flow, created by moving outside source, as well as for estimation of the source proper parameters and parameters of the statistical field propagation channel. The analytical form of the likelihood ratio is found and algorithms of the unknown information parameter estimation as the object of the statistical inverse problem solving are formed..

**Key words:** surface & internal tides,  $K_1$  harmonic, modelling, White Sea.

- Vladimirova E.M., Ivanov V.G., Ivanov D.V., Litvin A.D., Skopin N.A.* The Investigation of Mesoscale Flows within the Black Sea Upper Layer ..... 19

The results of velocity and temperature nature investigations in the Black sea upper layer during August 2005 are presented. The information about dynamics and structure of these fields was obtained. The existence of internal waves and localized regions of equal temperature and velocity is shown. The energetic and geometric structure characteristics of different nature in a season thermocline region were estimated.

**Key words:** seasonal thermocline, mezzo-scale structure, internal waves, temperature fluctuations, eddies.

- Tyugin D., Kurkina O., Kurkin A.* Software Package for Modeling of Internal Gravity Waves in the World Ocean ..... 32

In this paper software package for numerical modeling of transformation and propagation of internal gravity waves (IGW) in the World Ocean is presented. Short overview of implemented numerical models is given. They are: extended nonlinear evolutionary equation of Korteweg-de-Vries type with combined nonlinearity with variable coefficients (Gardner equation) and ray model reproducing the effect of refraction in an IGW package. The developed software package is unique and topical for this class of geophysical applications. Description of user interface and main working modes of the software are presented.

**Key words:** numerical modeling, data processing and visualization, wave refraction.

- Semenov E.V., Mortikov E.V.* Methods for Processing of Deep-Water Thermohaline Measurements ..... 45

We describe a method for approximate reconstruction of main hydrophysic fields using deep-water thermohaline measurements. Methods for solving both non-stationary and stationary, known as “diagnostic” problems, are presented. Proposed approaches are based on full non-linear system of equations of geophysical thermo-hydrodynamics. A series of results of computations performed from the mid 80-s and up to nowadays are reported.

**Key words:** data assimilation, variational problems, ocean thermo-hydrodynamics.

*Zimin A.V., Soloshchuk P.V., Isaev A.V.* Features of Currents in the Eastern Part of the Gulf of Finland Based on the Results of Instrumental Measurements in July 2010 .... 58

The paper presents the results of current velocity measurements which were carried out below the thermocline in the eastern part of the Gulf of Finland in the second half of July 2010. It was found that the structure of water circulation in the region is generally cyclonic in nature. Comparison of calculated geostrophic velocities with instrumental measurements showed a qualitative agreement only for the direction of currents. The measured modules of current velocity exceeded its values calculated by the dynamic method by two to eight times.

**Key words:** water circulation, instrumental measurements of current velocity, dynamic method for calculation of current velocity, the eastern part of the Gulf of Finland.

*Didenkulova I., Viška M., Kurennoy D.* Change of the Coast Profile under the Joint Effect of Ship and Wind Waves ..... 66

Coast dynamics resulting from the interplay of long vessel wakes and short background wind waves is studied experimentally in tideless conditions of Gulf of Finland. An attempt of qualitative study of impact of each wave system on a coast is made. Special attention is paid to two parameters: the change of sillage volume and the change of the coast profile shape, which is defined as an exponent in the power approximation of the coast. The analysis of these parameters and their variability for ship and wind waves demonstrate peculiarities of the ship wave and wind wave effect on the coast.

**Key words:** beach profile change, statistical moments, probability distributions, wind waves, ship waves, the Baltic Sea.

*Sukhorukov A.L.* Application of Method of Statistic Testing in the Task of Load Lifting from Deep Depth in Conditions of Random Sea State ..... 79

Nowadays, with account of depletion of hydrocarbon raw materials onshore there is a tendency to develop deep oil and gas fields. In course of development of the fields, significant amount of various lowering-and-hoisting operations are fulfilled. The task of determination of the forces in load lifting from deep depth in the conditions of random sea state is solved on the basis of statistic testing method (Monte Carlo method). Mathematical model took into account non-linearities caused by jerking and non-linearities of forces of the load hydrodynamic resistance. Comparison of the results with relevant solutions of linear tasks has been made.

**Key words:** load lifting, sea state, line, wave process, offshore operation, jerking.

УДК 519.6

© Д.Ю. Тюгин<sup>1</sup>, О.Е. Куркина<sup>1,2</sup>, А.А. Куркин<sup>1</sup>, 2011

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г.Н.Новгород  
dtyugin@gmail.com

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

Представлен программный комплекс, предназначенный для численного моделирования распространения и трансформации внутренних гравитационных волн в Мировом океане. Приведен краткий обзор реализованных математических моделей: расширенного нелинейного эволюционного уравнения Кортевега-де Вриза с комбинированной нелинейностью, переменными коэффициентами (уравнение Гарднера), рефракционной лучевой модели. Разработанный программный комплекс является универсальным, своевременным, востребованным и единственным в своем роде для такого класса геофизических задач. Приведено описание пользовательского интерфейса и рассмотрены основные режимы работы.

Ключевые слова: численное моделирование, обработка и визуализация данных, рефракция волн.

К настоящему времени сформировался круг общепризнанных в научном сообществе моделей для описания генерации и распространения внутренних гравитационных волн (ВГВ) в Мировом океане. Тем не менее их применение осложнено отсутствием единой среды для моделирования, различных способов визуализации и манипулирования данными.

Существует достаточно много программных продуктов, осуществляющих визуализацию, но не позволяющих интегрировать в них математические модели, например OceanDataView [1]. Программные продукты, включающие средства визуализации и возможность интеграции моделей, например MATLAB, как правило, рассчитаны на широкий круг задач. Применение такого программного обеспечения к рассматриваемой задаче не избавляет от написания программного кода. Визуализаторы имеют жесткий набор функциональности и не поддаются расширению в случае отсутствия необходимых режимов отображения. А скорость исполнения интерпретируемого кода не может конкурировать с программами, написанными на высокоуровневых языках.

Кроме того, существующие реализации математических моделей для описания ВГВ разрознены, реализованы для частных случаев (в географическом и физическом смысле), на различных языках программирования и доступны лишь локально. Эти модели также достаточно сложны, и их использование требует непростой предварительной подготовки входных данных.

Для ученых является обычной практикой работать с огромным набором различных систем, начиная от пакетов анализа данных, баз данных, инструментов визуализации и индивидуальных программ, каждая из которых предоставляет пользователю разный набор интерфейсов и форматов файлов. Как результат исследователь может потратить значительное количество времени, просто пытаясь заставить работать все эти компоненты вместе.

Разработанный программный комплекс – это первая попытка объединить различные модели ВГВ и входные данные из различных источников для автоматизации исследований ВГВ и снятия рутины подготовки, сравнения и выбора входных данных для этих моделей.

**Краткий обзор используемых моделей.** Для описания трансформации внутренних волн в горизонтально-неоднородном океане (с учетом двух горизонтальных координат) эффективными являются нелинейные лучевые методы [2, 3]. В первом приближении такие методы приводят к лучевым уравнениям линейной теории длинных волн [4]. Второе приближение в рамках такого подхода приводит к нелинейным эволюционным уравнениям типа Кортевега–де Вриза, описывающим трансформацию волны вдоль построенных лучей. Для простейшего случая плоских волн оно было получено в работе [5]. Простой способ вывода аналогичного уравнения, связанный с аддитивностью учета основных факторов, – нелинейности, дисперсии, горизонтальной изменчивости – приведен в работе [3] для произвольной геометрии движения внутренней волны. В представленном программном комплексе в настоящее время реализованы и используются следующие модели для низшей моды внутренних гравитационных волн.

**Линейная лучевая модель распространения внутренних гравитационных волн.** Фазовая скорость линейных внутренних волн, которая определяется трехмерной плотностной стратификацией вод океана, является основным фактором, определяющим форму волновых лучей и фронтов при распространении длинных линейных внутренних волн. Зависимость фазовой скорости от времени не учитывается в работе, поскольку, как показывают расчеты на основании различных источников, даже сезонные изменения этого параметра невелики для внутренних волн. Это подтверждается результатами расчетов фазовой скорости на основании различных источников гидрологических данных, проведенных при разработке программного комплекса. Таким образом, при построении модели мы считали, что рефракция внутренних волн преимущественно определяется пространственной неоднородностью вод океана. Модель протестирована на аналитическом примере [6] и показала хорошее согласие расчетов с теоретическими предсказаниями.

Рефракционная лучевая модель характеризуется следующими лучевыми уравнениями [7, 4]:

$$\frac{d\vec{R}}{ds} = \frac{c^2}{\omega} \vec{k}, \quad \frac{d\vec{k}}{ds} = -(\nabla c) |\vec{k}|,$$

где  $\vec{R} = (x, y)$  – радиус-вектор точки на луче;  $\vec{k} = (k_x, k_y)$  – волновой вектор, касательный к лучу в каждой точке;  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  – модуль волнового вектора;  $\omega = ck$  – частота длинных волн;  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$  – дифференциальный оператор, действующий в плоскости  $(x, y)$ ;  $c = c(x, y)$  – фазовая скорость внутренней волны, которая считается заданной;  $s$  – время, изменяющееся при движении по лучу.

Лучевая картина, в частности, дает качественное представление о распределении энергии внутреннего волнового поля в горизонтальной плоскости. Энергия концентрируется там, где фокусируются волновые лучи, и уменьшается там, где лучи разрежаются.

**Уравнение Гарднера для внутренних волн в однородном бассейне.** Исходным уравнением для описания длинных одномодовых слабонелинейных внутренних волн в стратифицированном океане является расширенное нелинейное эволюционное уравнение Кортевега–де Вриза с комбинированной нелинейностью, также известное как уравнение Гарднера [8–10]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

где  $\eta$  – смещение изопикнической поверхности в максимуме вертикальной моды;  $c$  – фазовая скорость длинных линейных внутренних волн;  $\alpha$  – коэффициент квадратичной нелинейности;  $\alpha_1$  – коэффициент кубической нелинейности;  $\beta$  – коэффициент дисперсии.

Коэффициенты этого уравнения определяются вертикальным распределением поля плотности (соответствующие выражения приведены, например, в [9, 10]). Горизонтальная изменчивость гидрологии обычно медленная (в масштабах длины внутренней волны), что и позволяет применять уравнение (1) локально. Однако исследование горизонтальной изменчивости кинематических и нелинейных параметров поля внутренних волн, обеспечиваемое картами, построенными на основе различных источников гидрологических данных и доступными в представленном программном комплексе, является важной задачей в теории прогноза внутренних волн.

**Обобщенное уравнение Гарднера для внутренних волн, распространяющихся вдоль разреза в неоднородном океане.** Учет горизонтальной неоднородности гидрологии и глубины бассейна приводит к изменчивости коэффициентов уравнения (1) вдоль направления распространения волны. Изменчивость коэффициентов во многих случаях можно рассматривать достаточно плавной (в масштабах длин волн), так что отражением от неоднородности можно пренебречь. Тем не менее уравнение (1), выведенное для среды с неизменной стратификацией по горизонтали, перестает быть справедливым. Его обобщение на случай плавно неоднородной среды имеет вид

$$\frac{\partial \xi}{\partial X} + \left( \frac{\alpha(X)Q(X)}{c^2(X)} \xi + \frac{\alpha_1(X)Q^2(X)}{c^2(X)} \xi^2 \right) \frac{\partial \xi}{\partial s} + \frac{\beta(X)}{c^4(X)} \frac{\partial^3 \xi}{\partial s^3} = 0,$$

где  $\xi(s, X) = \frac{\eta(s, X)}{Q(X)}$ ;  $\Phi(z)$  – функция, описывающая вертикальную структуру внутренних волн;  $s = \int \frac{dX}{c(X)} - t$ ;  $X$  – координата вдоль разреза;  $Q$  – линейный фактор усиления.

Метод решения данного уравнения, а также верификация численной схемы описаны в [5, 11–13].

**Данные для инициализации моделей.** В последние годы благодаря развитию наблюдательных сетей [14] в океане появилось большое количество гидрологических данных в открытых источниках. А их доступность широкой общественности позволяет проводить исследование Мирового океана на основе математического моделирования [15–17]. Кроме того, такие источники постоянно обновляются [18–21], что позволяет отслеживать глобальные изменения [22, 23] и поддерживать результаты моделирования в актуальном состоянии.

В настоящей работе использованы два международных гидрологических атласа – WOA и GDEM, а также атлас батиметрии GEBCO для береговой линии.

WOA [24] (World Ocean Atlas 2005, WOA05) и GDEM [25] (Generalized Digital Environmental Model, GDEM V 3.0) – это массивы усредненных и сглаженных данных натуральных измерений температуры, солености и других гидрологических параметров Мирового океана.

Данные WOA 2005 представлены на одноградусной и пятиградусной сетках с 33-мя уровнями глубины (0–5500 м). В настоящей работе использовались данные за июль, январь, а также летний и зимний периоды.

Данные GDEM представлены на четвертьградусной сетке с 78 уровнями глубины (0–9999 м). Использовались месячные данные за январь и июль, так как за летние и зимние периоды таких данных в открытом доступе найдено не было.

Данные GDEM также содержат массивы температуры и солености, однако разделены на отдельные области; всего таких областей 8 и, кроме того, они имеют разное разрешение в различных областях.

GEBCO [26] – цифровой атлас батиметрии Мирового океана. Он разрабатывается под эгидой Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО международной группой экспертов, разрабатывающих ряд батиметрических наборов данных. Этот атлас содержит набор данных батиметрии с одномоментным разрешением. В программном комплексе использованы данные этого атласа с 10-минутным разрешением для береговой линии.

Все атласы имели различный формат данных и разрешение сетки, поэтому для расчетов потребовалась их первоначальная обработка. Результаты были преобразованы в бинарный формат с определенной структурой – таблицу индексов, содержащую информацию о широте, долготе и позиции данных соответствующей точки в файле, и проиндексированный файл с данными. Такое разделение обеспечивает высокую скорость доступа к произвольному участку последних, что в конечном счете увеличивает быстродействие всего комплекса.

По данным о температуре и солености, взятым из климатологических атласов, рассчитывались значения плотности морской воды на основе международного уравнения состояния [27], реализованного непосредственно внутри программного комплекса.

**Описание программного комплекса.** Программный комплекс состоит из нескольких единиц: консольного и графического приложений. Такое разделение обусловлено выделением части наиболее требовательных к ресурсам вычислений, которые не требуют повторных расчетов. Например, расчет карт коэффициентов уравнения Гарднера проводится только один раз – для новых данных при интеграции в комплекс.

Консольное приложение состоит из нескольких модулей, обеспечивающих преобразование форматов данных, предварительную обработку гидрологических атласов, расчет плотности морской воды, частоты Вайсяля–Брента, а также кинематических и нелинейных параметров ВГВ в рамках уравнения Гарднера. Консольный интерфейс не накладывает дополнительных требований на среду выполнения программы, например наличие графической оболочки, и не ограничивает применение программного кода определенной операционной системой. Учитывая большой объем данных и длительное время расчетов, в будущем целесообразно применение технологий распараллеливания, например OpenMP или MPI, для дальнейшего использования на кластерных системах, где не всегда присутствует окружение для запуска графического интерфейса. Общая структура комплекса приведена на рис. 1.

На основе полученных результатов можно проводить сравнение гидрологических источников данных, оценить предельные амплитуды и скорость ВГВ, а также использовать эти результаты в качестве исходных данных для других моделей и проводить численные эксперименты. Для этого в программном комплексе реализовано приложение с графическим интерфейсом.

Это приложение может распространяться отдельно от программного комплекса в качестве атласа по тематике моделирования внутренних гравитационных волн. Совокупность данных по определенной проблеме океанологии и средств визуализации является на сегодняшний день востребованным продуктом [28, 29].

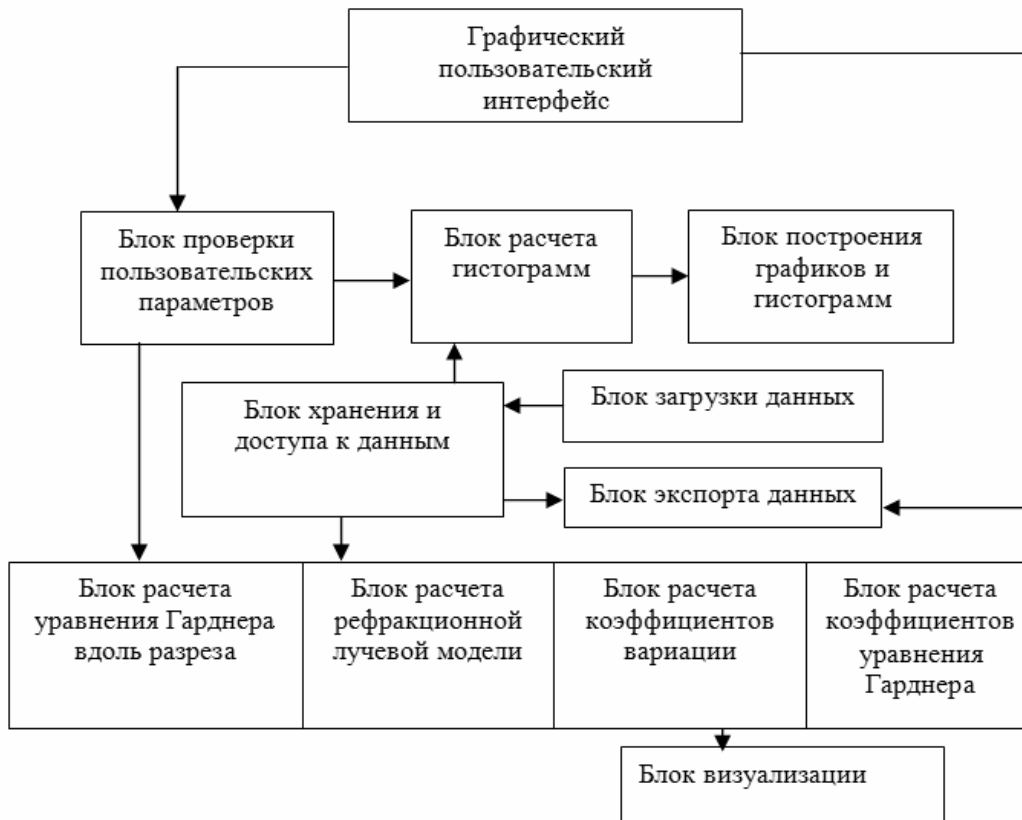


Рис. 1. Структура программного комплекса.

Для реализации интерфейса была выбрана библиотека Qt [30], так как она обладает рядом преимуществ. Qt – это кроссплатформенная C++ библиотека для разработки графического интерфейса приложений. Она предоставляет разработчикам все возможности, необходимые для создания приложений с высококачественным пользовательским интерфейсом [31], полностью объектно-ориентированная, расширяемая и легкая в применении библиотека [32], является основой для тысяч успешных приложений по всему миру и используется в таких крупных компаниях, как AT&T, NASA, IBM.

В качестве языка программирования для данного комплекса был выбран универсальный язык C++, который позволяет разрабатывать программы в соответствии с разными парадигмами: процедурной, объектно-ориентированной, параметрической.

Использование языка C++ дает возможность высокоуровневого программирования на основе иерархии классов, позволяющего относительно наглядно делить программу на взаимодействующие модули и писать самые разные программы, сочетающие наглядность кода и высокую скорость его работы.

Пользовательский интерфейс графического приложения состоит из меню, панели инструментов, области визуализации и области задания и вывода параметров. Внешний вид представлен на рис. 2.

Область визуализации реализует наглядное представление параметров в виде карт с геопривязкой. Данный компонент имеет обширные возможности по настройке цветовой схемы, отображению опорных точек и других параметров визуализации. Редактор палитры позволяет создать, сохранить, загрузить и отредактировать необходимую цветовую схему. Назначив опорные цвета для каждого значения, можно автоматически рассчитать их для промежуточных значений. Редактор позволяет также назначить вид шкалы, отображающейся в области визуализации, указав десятичный, или экспоненциальный, тип и число знаков после запятой.



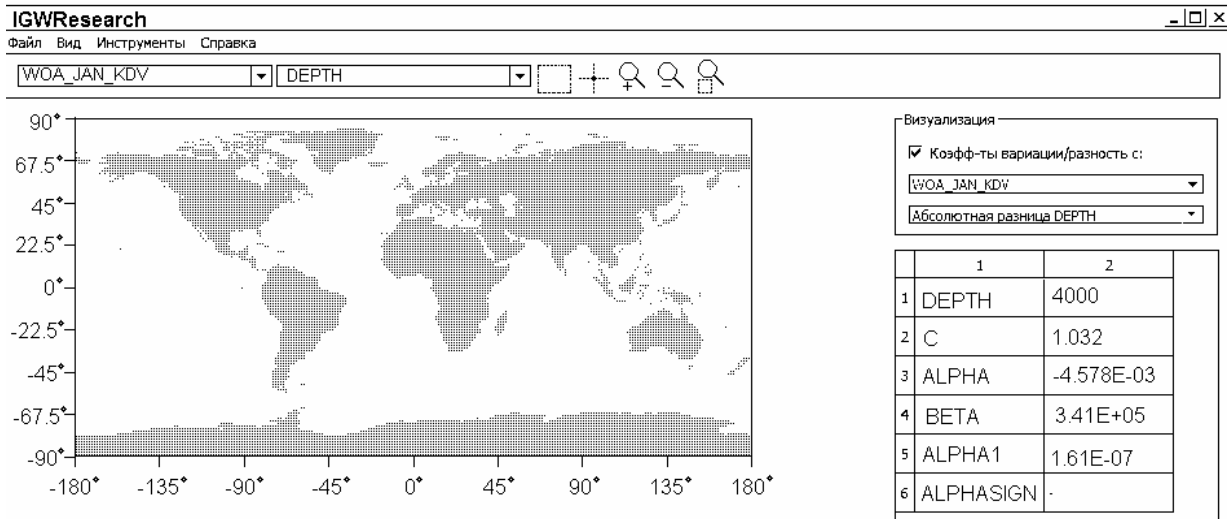


Рис. 2. Пользовательский интерфейс программного комплекса.

Панель инструментов содержит средства выбора атласа и параметров, доступных для визуализации в выбранном атласе, а также элементы управления картой: увеличение и уменьшение масштаба, выбор области, выбор точки.

Основные функции, доступные через меню, – настройка одного из четырех режимов: режим просмотра, режим «статистика», режимы проведения расчетов по рефракционной модели и модели уравнения Гарднера вдоль разреза.

В зависимости от выбранного режима происходит динамическое построение интерфейса, что позволило сделать его интуитивно понятным и компактным. Область задания и вывода параметров содержит элементы управления, ассоциированные с выбранным режимом. Общие функции вызываются посредством меню или панели инструментов. Остановимся подробнее на каждом из режимов работы программы.

**Режим просмотра.** В данном режиме пользователь может выбирать отдельные точки на карте и просматривать численные значения двухмерных (по горизонтали) параметров. Вывод данных сводится в таблицу (рис. 2).

Параметры уравнения Гарднера (двухмерные) рассчитаны на основе интегрирования выражений, включающих низшую вертикальную моду внутренних волн и ее производную по вертикальной координате, которые, в свою очередь, рассчитаны с использованием вертикальных профилей плотностной стратификации. Эти трехмерные данные могут представлять интерес при исследовании динамики внутренних волн, поэтому доступ к ним и возможность визуализации этих профилей реализованы в рамках комплекса. Для параметров, содержащих трехмерные данные, предусмотрено построение графика в выбранной точке по глубине. График может быть экспортирован в файл текстового формата или сохранен в виде картинки.

При выборе источника данных для моделей предусмотрены средства сравнения атласов по ряду параметров. В текущей версии комплекса реализованы расчет и визуализация коэффициентов вариации для кинематических и нелинейных параметров уравнения Гарднера, разницы знаков нелинейных параметров, а также генерация и визуализация карт абсолютной разницы глубин. Доступно сравнение между атласами и в пределах одного атласа по сезонам и месяцам.

Для параметров дисперсии, фазовой скорости и глубины коэффициент вариации вычисляется по следующим формулам:

$$K_v = \left| \frac{F_1 - F_2}{F_{cp}} \right| \cdot 100\%, \quad F_{cp} = \frac{F_1 + F_2}{2};$$

для параметров кубической и квадратичной нелинейности – по формулам

$$K_v = \text{sign}(F_1) \cdot \text{sign}(F_2) \cdot \frac{\|F_1| - |F_2\|}{R_v} \cdot 100\%, \quad R_v = \frac{|F_1| + |F_2|}{2},$$

где  $K_v$  – коэффициент вариации;  $R_v$  – размах вариации;  $F_1, F_2$  – значения указанных параметров, полученных по данным из источника 1 (GDEM) и 2 (WOA) соответственно.

**Режим «статистика».** Данный режим предоставляет средства статистического анализа данных и представления результатов в виде гистограмм и графиков. Он позволяет провести количественный и качественный анализы данных в выбранном атласе, а также сравнить атласы между собой.

На панели ввода параметров отображается область атласа, в которой рассчитывается распределение. Данная область задается с помощью инструмента «Выбор области» на панели инструментов.

Вторая опция работы данного режима – «Сравнение атласов» – позволяет провести сравнение двух атласов по ряду параметров. Аналогично режиму просмотра карт коэффициентов вариации доступна произвольная комбинация атласов, позволяющая сравнивать между собой любые атласы, в том числе один и тот же атлас по сезонам и месяцам.

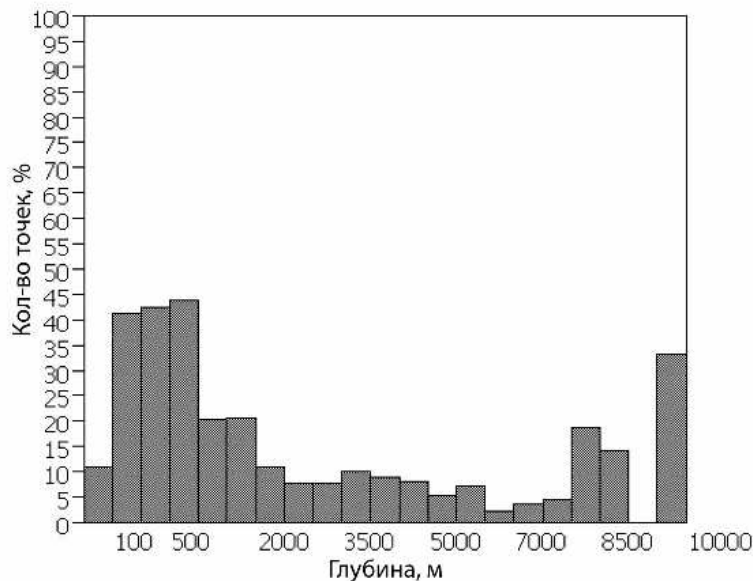


Рис. 3. Пример использования средств статистического анализа (гистограмма распределения разницы знаков июль–январь по атласу GDEM параметра кубической нелинейности  $\alpha_1$ ).

На рис. 3 представлена гистограмма распределения точек, где коэффициент  $\alpha_1$  имеет различные знаки для июльского и январского периодов по атласу GDEM, по глубине.

Доступные виды сравнения: разница знаков кубической нелинейности; разница знаков квадратичной нелинейности; коэффициент вариации дисперсии; коэффициент вариации фазовой скорости; коэффициент вариации глубины; гистограмма сравнения дисперсии; гистограмма сравнения фазовой скорости.

**Режим расчета по рефракционной модели.** Рефракционная модель позволяет проводить моделирование распространения и трансформации ВГВ в виде лучей на основе данных о фазовой скорости. Пример результатов моделирования представлен на рис. 4.

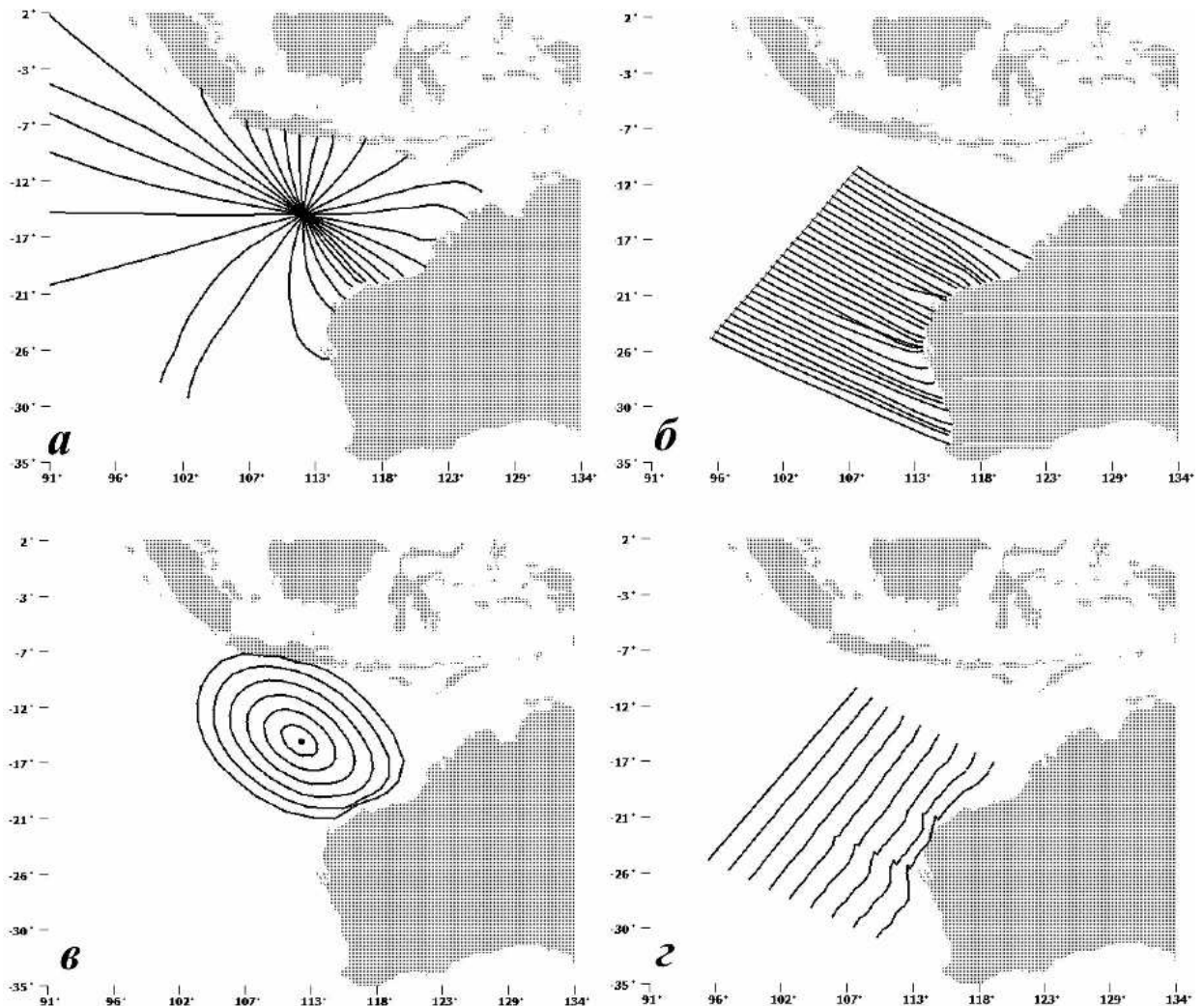


Рис. 4. Пример моделирования распространения ВГВ в рамках рефракционной модели, различные виды визуализации и типы источников (*а, б* – лучи; *в, г* – фронты).

Для запуска расчета пользователю предлагается задать время расчета, шаг по времени, количество лучей, тип источника (точечный или линия) и его координаты, направление распространения; в случае, если выбран источник-линия, тип визуализации – лучи или фронты.

**Режим расчета по модели уравнения Гарднера.** Уравнение Гарднера позволяет моделировать эволюцию волны вдоль разреза. Задание начальных условий предусматривает выбор начальной формы волны – одна из заранее определенных форм (КДВ-солитон, Гарднер-солитон) или пользовательская форма, загружаемая из файла, задание амплитуды волны, шага расчета по пространству, времени расчета, ширины и координат разреза.

Разрез представляет собой отрезок, задаваемый двумя точками на карте того или иного параметра. Так как все данные имеют геопривязку, а уравнение Гарднера – одномерное по пространственной координате, то необходимо преобразовать отрезок на кар-

тах коэффициентов в соответствующие функции одной переменной – координаты вдоль разреза. Этапы преобразования приведены схематично на рис. 5.

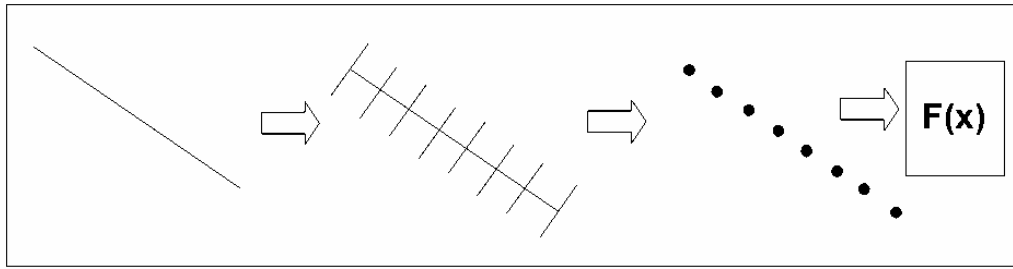


Рис. 5. Преобразование коэффициентов.

После задания разреза на карте пользователем происходит создание функции коэффициентов вдоль разреза. Разрез может иметь произвольное расположение относительно точек сетки. Для того чтобы получить значение параметров в опорных точках линии разреза, используется билинейная интерполяция сетки с данными, позволяющая получить значения в искомым точках, необязательно совпадающих с точками сетки. При сглаживании случайных скачков данных может использоваться усреднение коэффициентов; для этого перпендикулярно линии разреза строятся линии, вдоль которых берется среднее арифметическое значение коэффициентов; ширина усреднения задается пользователем. Далее преобразуются координаты каждой точки из географических в метры, затем – к одной координате. Интерполяция позволяет представить данные в виде одномерной функции и получить произвольное разрешение по пространственной координате, необходимое для работы численной схемы.

Выбранные данные можно проанализировать перед проведением расчетов встроенными средствами анализа. Доступно построение графиков всех коэффициентов, используемых в расчетах вдоль разреза.

Результаты моделирования представляются в виде графиков формы волны в начальный и конечный моменты времени.

**Особенности реализации.** В задачах численного моделирования неизбежно возникает потребность в программных средствах обеспечивающих быстрый доступ к массивам данных. В случае с моделированием внутренних гравитационных волн такие данные, как правило, имеют еще и большой объем. Так, объем данных с численными массивами плотности морской воды может составлять от нескольких сотен мегабайт до нескольких гигабайт – в зависимости от разрешения.

При разработке программного комплекса возникла задача создания программных средств и эффективных методов для хранения и доступа к данным. Международный гидрологический атлас GDEM, применяемый в данном комплексе для задания гидрологических условий, имеет неоднородную структуру. Он состоит из областей различного разрешения, и его хранение, загрузка и организация «прозрачного» доступа для численных моделей являются нетривиальной задачей. Большая часть градусной сетки атласа содержит разрешение  $1/2$  градуса. Однако некоторые части имеют разрешение  $1/4$  или даже  $1/6$  градуса. Если всю сетку преобразовать к разрешению в  $1/6$  градуса посредством интерполяции, то объем необходимой оперативной памяти может оказаться недостаточным для хранения всего массива в памяти. Обращение к жесткому диску каждый раз при доступе к данным в процессе работы модели является неэффективным решением, увеличивающим время расчета. Кроме того, в комплексе предусмотрена визуализация данных и имеет жесткие требования ко времени перерисовки. Также при оценке расчетной

области полезно знать частоту опорных точек сетки с данными, что невозможно при интерполяции атласа на одну сетку. В будущем при появлении данных с большим разрешением объем занимаемой памяти может оказаться весьма внушительных размеров для среднестатистической рабочей машины исследователя. Как правило, данных с высоким разрешением немного, поэтому с целью экономии памяти был разработан ряд классов и алгоритмов для представления нескольких областей разного разрешения в виде одной сущности (рис. 6).

Каждая область (F1, F2, F3, F4) загружается в контейнер с коэффициентом приоритета (P1, P2 и т.д.), предоставляющий стандартные средства доступа к данным. Приоритет используется для хранения пересекающихся областей. На рис. 6 обозначенные области F1, F2, F3 пересекаются с областью F4, им будет назначен более высокий приоритет, так как они имеют более высокое разрешение данных.

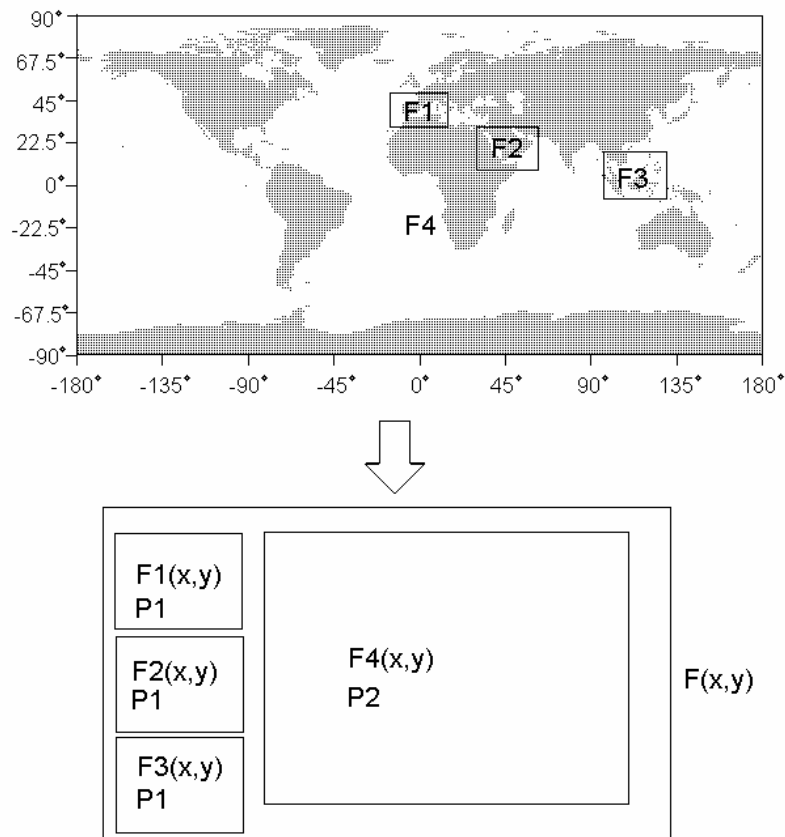


Рис. 6. Программное представление атласа с областями разного разрешения.

Далее все контейнеры собираются в результирующий контейнер. При обращении к данным происходит быстрый поиск по границам областей с целью определения подходящего первичного контейнера, имеющего максимальный приоритет. Найденный контейнер предоставляет запрошенные данные. Все области по отдельности содержат данные на регулярной сетке, поэтому доступ возможен посредством линейной интерполяции, рассчитываемой непосредственно в момент запроса. Таким образом, доступ к данным через контейнер верхнего уровня прозрачен для численных схем и визуализаторов, как если бы они обращались к данным с одинаковым разрешением. Линейная интерполяция позволяет обращаться к картам с любым шагом. Там, где выше разрешение, будет выше и приближенность интерполированного значения к реальным данным. При таком

подходе возможно хранение дополнительной информации об опорных точках без накладных расходов памяти.

При разработке компонентов для визуализации учитывалась скорость работы при различных способах создания графики [30], стратегий обновления области визуализации, а также скорость расчета данных палитры. Построение графики из примитивов может вызвать накладные расходы процессорного времени, так как обращение к окну будет вызывать перерисовку области визуализации, даже когда этого не требуется. Чтобы оптимизировать производительность, был использован буфер, позволяющий создать пиксельное изображение из набора примитивов. Таким образом, при перерисовке копируется область памяти с изображением без вызова десятка функций построения графики. Копирование видеопамати является оптимизированной функцией драйвера видеокарты и накладные расходы при перерисовке области визуализации не более чем при построении обычного окна.

В результате использования низкоуровневых функции построения графики и оптимизации работы алгоритмов обновления, а также изложенного выше способа представления данных удалось достичь приемлемой производительности. Время обновления на типовом компьютере с процессором Intel Core 2 Duo 1.8ГГц, 2Гб оперативной памяти, скорость построения графики не превышает одной секунды для любого из атласа, используемого в данном комплексе.

\*\*\*

В статье представлено описание структуры, интерфейса и функциональности комплекса. Реализованы математические модели для расчета кинематических и нелинейных параметров ВГВ, эволюции волны вдоль разреза в рамках уравнения Гарднера и расчета лучевых траекторий ВГВ в рамках рефракционной лучевой модели. Интегрированы международные атласы температуры и солёности Мирового океана. Наличие нескольких атласов из разных источников и встроенные средства анализа позволяют сравнить атласы между собой по ряду параметров. Подобный анализ необходим при выборе исходных данных для моделей.

Разработан ряд компонентов для задач визуализации и ввода параметров. Интерактивный выбор данных существенно облегчает задание начальных условий для моделей, так как процесс выборки данных в силу специфики моделей может являться объемной задачей.

Полученная программная среда объединяет данные и набор математических моделей, направленных на решение определенного круга задач в контексте исследования внутренних гравитационных волн. Такое объединение дает возможность сосредоточиться исследователю на проведении численных экспериментов и анализе результатов, а не на рутинной подготовке данных и моделей, поиске способов визуализации, анализа и оперирования выходными данными моделей.

Рассмотренные параметры, такие как фазовая скорость, параметр дисперсии и параметры нелинейности слабонелинейных моделей КдВ-типа, могут быть использованы для экспресс-оценок возможных полярностей, форм уединенных внутренних волн, их предельных амплитуд, скорости распространения и т.д. Они полезны не только для моделирования эволюции внутренних волн в рамках слабонелинейных моделей, но и для инициализации и задания внешних условий среды в более сложных полнонелинейных, двух- и трехмерных моделях внутренних гравитационных волн (IGW, MIT GCM, POM).

Программный комплекс находится в постоянном развитии. Текущие направления разработки включают интеграцию новых моделей, средств оперирования входными и выходными данными, создание специфических визуализаторов, увеличение производи-

тельности посредством параллельных алгоритмов, применение последних достижений программных средств [33].

Программный комплекс был представлен на всероссийских и международных конференциях в 2010–2011 гг. Авторское право засвидетельствовано [34, 35].

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., а также при поддержке грантов Президента РФ для молодых российских ученых – докторов наук (МД-99.2010.5) и РФФИ 10 05 00199а.

## Литература

1. Schlitzer R. Ocean Data View (ODV5.7, 2000). [Electronic data and program] // Bremerhaven: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. Germany. 2004.
2. Пелиновский Е.Н., Фридман В.Е., Энгельбрехт Ю.К. Нелинейные эволюционные уравнения. Таллин. Валгус. 1984. 154 с.
3. Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г., Степанянц Ю.А. Моделирование распространения нелинейных внутренних волн в горизонтально неоднородном океане // Изв. РАН ФАО. 1994. Т. 30, № 1. С.79–85.
4. Миропольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане // Л.: Гидрометеоздат, 1981. 302 с.
5. Пелиновский Е.Н., Шаврацкий С.Х., Раевский М.А. Уравнение Кортевега–де Вриза для нестационарных внутренних волн в неоднородном океане // Изв. АН СССР ФАО. 1977. Т.13, № 3. С.325–328.
6. Mei C.C. The applied dynamics of ocean surface waves. New York: Wiley Interscience publication, 1983. 740 p.
7. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989.
8. Полухина О.Е. Обобщенное уравнение Кортевега–де Вриза в теории нелинейных внутренних волн в стратифицированных потоках: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н.Новгород, 2002. С.109–130.
9. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. Internal tide transformation and oceanic internal solitary waves. Ch. 2: Environmental Stratified Flows / Ed. R. Grimshaw. Kluwer Acad. Publ. 2002. P.29–60.
10. Pelinovsky E., Polukhina O., Slunyaev A., Talipova T. Internal solitary waves // Ch. 4. Solitary Waves in Fluids. WIT Press. Southampton. Boston, 2007. P.85–110.
11. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf // Physical Oceanography. 1997. V.27, N 6. P.871–896.
12. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. A Generalized Korteweg–de Vries Model of Internal Tide Transformation in the Coastal Zone // Geophys. Res. 1999. 104(C8). 18333–18350.
13. Кокорина А.В., Талипова Т.Г. Применение псевдоспектрального метода для моделирования диссипации волн в рамках уравнения Гарднера // Изв. Академии инженерных наук РФ. Прикладная математика и механика. 2002. Т.3. С.62–68.
14. Roemmich D., Boebel O., Freeland H. et al. On the design and Implementation of Argo – An initial Plan for a global array of Profiling Floats. International CLIVAR project Office ICPO Report N 21. GODAE Report N 5. Published by the GODAE International Project office, c/o Bureau of Meteorology. Australia. Melbourne, 1998. 32 p.
15. Платов Г.А., Голубева Е.Н. Изучение промежуточных вод Японского моря на основе численного моделирования с использованием данных климатического распределения температуры и солености // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т.44, № 3. С.392–412.
16. Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Труков Б.С., Зеленко А.А. Статистическая структура пространственной изменчивости термохалинных полей океана по данным профильных наблюдений системы ARGO за 2005–2007 // Океанология. 2010. Т.50, № 2. С.165–183.
17. Матишов Г.Г., Архипова О.Е., Чикин А.Л. Модельный подход к восстановлению данных по солености на примере Азовского моря // Докл. АН. 2008. Т.420, № 5. С.687–690.
18. Levitus S., Boyer T.P., Conkright M.E. et al. World Ocean Database 1998: V.1: Introduction. NOAA Atlas NESDIS 18. U.S. Gov. Printing Office. Wash. D.C. 1998. 346 p.
19. Boyer T.P., Stephens C., Antonov J.I. et al. World Ocean Atlas 2001. V. 2: Salinity / Ed. S. Levitus. NOAA Atlas NESDIS 50. U.S. Gov. Printing Office. Wash. D.C. 2002. 165 p.
20. Stephens C., Antonov J.I., Boyer T.P. et al. World Ocean Atlas 2001. V.1: Temperature / Ed. S. Levitus. NOAA Atlas NESDIS 49. U. S. Gov. Printing Office. Wash. D.C. 2002. 176 p.
21. Boyer T.P., Antonov J.I., Garcia H.E. et al. World Ocean Database 2005 / Ed. S. Levitus. NOAA Atlas NESDIS 60. U.S. Government Printing Office. Wash. D.C. 2006. 190 p.
22. Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P. et al. Warming of the World Ocean // Science. 2000. V.287. P. 2225–2229.

23. *Levitus S., Antonov J., Boyer T.* Warming of the world ocean, 1955–2003 // *Geoph. Res. Let.* 2005. V. 32.
24. *Conkright M.E., Antonov J.I., Baranova O.* et al. World Ocean Database 2001, Volume 1: Introduction / Ed. S.Levitus. NOAA Atlas NESDIS 42. U.S. Gov. Printing Office. Wash. D.C. 2002. 160 p.
25. *Teague W.J., Carron M.J., Hogan P.J.* A Comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus Climatologies // *Geophys. Res.* 1990. V. 95. C5. P. 7167–7183.
26. *Jakobsson M., Macnab R.* A comparison between GEBCO Sheet 5.17 and the International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) ver. 1.0. *Marine Geophys. Res.* Springer. 2006. P.35–48.
27. *Fofonoff N., Millard R.Jr.* Algorithms for computation of fundamental properties of seawater // UNESCO Technical Papers in Marine Science. N 44. 1983. P. 15–25.
28. *Ростов И.Д., Мороз В.В., Рудых Н.И., Ростов В.И.* Электронный атлас по океанографии Южно-Китайского моря // *Океанология*. 2009. Т.49, № 6. С.942-946.
29. *Мороз В.В., Богданов К.Т., Ростов В.И., Ростов И.Д.* Электронный атлас приливов окраинных морей Северной Пацифики // *Вестник ДВО РАН*. 2010. № 1. С. 102–106.
30. *Бланиет Ж., Саммерфилд М.* Qt 4. Программирование GUI на C++. М.: КУДИЦ-Пресс, 2007. 648 с.
31. *Ezüst A., Ezüst P.* Introduction to Design Patterns in C++ with Qt 4. Prentice Hall, 2007. P.656.
32. Mark Summerfield *Advanced Qt Programming: Creating Great Software with C++ and Qt 4.* Prentice Hall. 2010. 533 p.
33. *Шлее М.* Qt4.5. Профессиональное программирование на C++. БХВ-Петербург, 2010. 896 с.
34. *Куркина О.Е., Тюгин Д.Ю., Гиниятуллин А.Р., Куркин А.А.* Программа для ЭВМ «Просмотр коэффициентов (программа доступа к атласам кинематических и нелинейных параметров длинных внутренних гравитационных волн в Мировом океане)». Россия. А.С. 2010615219. Роспатент, 2010.
35. *Куркина О.Е., Тюгин Д.Ю., Гиниятуллин А.Р., Куркин А.А.* Программа для ЭВМ «Моделирование внутренних гравитационных волн рефракционной моделью». Россия. А.С. 2010615884. Роспатент, 2010.

Статья поступила в редакцию 22.03.2011 г.

