

Д.Ю. Тюгин, О.Е. Куркина, А.А. Куркин
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ВИЗУАЛИЗАЦИИ
И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИНАМИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН
В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ОКЕАНЕ

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород*

В статье представлен программный комплекс для исследования внутренних волн в стратифицированном океане. Рассмотрены модели для описания динамики внутренних волн. Обсуждаются задачи при проведении численного эксперимента. Предложен инструмент для автоматизации исследований. Рассмотрены подробно аспекты реализации программного комплекса, трехслойная программная модель представления данных, графический пользовательский интерфейс. Результатом является программный комплекс, позволяющий проводить численное моделирование динамики внутренних волн в стратифицированном океане на базе модели уравнения Гарднера.

Ключевые слова: программный комплекс, уравнение Гарднера, внутренние волны

Сильнонелинейные внутренние волны, особенно волны большой амплитуды, наблюдаемые во многих акваториях Мирового океана [1], оказывают существенное воздействие на среду, в которой они распространяются, ввиду огромной энергии, заключенной в них, индуцированных ими течений и значительных скоростей. Проявление уединенных внутренних волн и их воздействие на рельеф дна, а также прибрежные и морские гидротехнические сооружения, существенно зависит от типа стратификации в конкретной области моря. Их изучение является одной из задач океанологии, так как такие волны играют важнейшую роль в процессах обмена энергией в океане, участвуют в распространении примесей и загрязнений.

В настоящее время распространены два класса моделей для описания динамики внутренних волн. Основой одного класса является численное интегрирование двумерных (горизонтальная и вертикальная координаты), нелинейных систем уравнений Навье – Стокса. В основу другого класса положена слабонелинейная теория длинных волн, при которой длина волны значительно превышает глубину жидкости. В этом классе моделей применяется одномерное эволюционное уравнение, описывающее распространение и трансформацию волн. В приближении первого порядка это уравнение Кортевега – де Вриза (КдВ). Его коэффициенты определяются вертикальным профилем плотности, распределением горизонтального сдвигового течения, условиями на поверхности. Уравнение КдВ было выведено для различных случаев и параметров среды [2] и показало свою эффективность [3].

При описании волн больших амплитуд уравнение Кортевега – де Вриза может быть недостаточным. Это приводит к необходимости уточнения модели, путем учета поправок следующих порядков малости. В таком случае для описания распространения одномодовых внутренних волн является расширенное нелинейное эволюционное уравнение Кортевега – де Вриза с комбинированной нелинейностью (уравнение Гарднера) [4].

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

где η – смещение изопикнической поверхности в максимуме вертикальной моды; c – фазовая скорость; α – коэффициент квадратичной нелинейности; α_1 – коэффициент кубической нелинейности; β – коэффициент дисперсии. Параметры уравнения Гарднера (c , α , α_1 и β) напрямую зависят от стратификации плотности и глубины океана.

Данное уравнение, решаемое численно неявной псевдоспектральной схемой [5] было положено в основу программного комплекса.

При реализации программного комплекса особое внимание было уделено интеграции данных в комплекс. Именно подготовка данных зачастую занимает очень много времени. Как правило, исследователи сталкиваются с задачей подготовки входных данных, так как не всегда моделирующий комплекс имеет набор данных для запуска расчета. Такая подготовка может занимать много времени, а перенос из одних программных продуктов, которые имеют возможности по обработке данных в другие, реализующие численные расчеты, сопряжено с конвертацией форматов и преобразованием сеток опорных точек. Поэтому в настоящем программном комплексе была рассмотрена программная модель данных, позволяющая как импортировать данные из различных источников, так и проводить на них расчеты по численным моделям.

Для инициализации численных моделей в программном комплексе используются данные плотности и частоты Брента – Вайсяля, полученные с помощью международного уравнения плотности [6] на основе гидрологических атласов WOA [7], GDEM [8], RCO [9]. Для задания береговой линии применяется атлас батиметрии ETOPO1 [10].

Атлас GDEM – международный гидрологический атлас на основе натуральных измерений. Содержит численные массивы среднемесячных климатических данных о вертикальном распределении температуры и солёности. Он содержит блоки усредненных данных за январский и июльский периоды. Координатная сетка равномерная по областям. Разрешение сетки составляет от 1/2 до 1/6 градуса. Диапазон долготы: 180° в.д. – 180° з.д., диапазон широты: 78° ю.ш. – 90° с.ш. Содержит 58 уровней глубины с максимальным значением 9999 метров.

Атлас WOA – международный гидрологический атлас, составленный на основе натуральных измерений. Содержит блоки усредненных данных по месяцам (январь – июль), временам года (летний/зимний). Разрешение сетки данных постоянное и составляет 1/2 градуса. Диапазон долготы: 179.5° в.д. – 179.5° з.д., диапазон широты: 89.5° ю.ш. – 89.5° с.ш. Содержит 33 уровня глубины с максимальным значением 5500 метров.

Атлас RCO представляет модельные данные температуры и солёности высокого разрешения по Балтийскому морю, полученные в Таллинском технологическом университете на основе численной модели TRACMASS [9]. Содержит блоки данных с разрешением 1/15 по долготе, 1/30 по широте с шагом 6 часов с 1961 по 2005 года. Диапазон долготы: 9.5167° в.д. – 30.1834° в.д., диапазон широты: 53.925° с.ш. – 65.825° с.ш. Содержит 41 уровень глубины, с максимальным значением 249 метров.

Атлас батиметрии ETOPO1 содержит данные глобального рельефа Земли с 1-минутным разрешением сетки.

Существует немало библиотек для работы с хранением и загрузкой многомерных данных. Перенос данных между различными архитектурами аппаратного обеспечения наиболее полно реализован в библиотеке netCDF [11]. Также формат данных предоставляемой библиотекой является де-факто стандартом в хранении научных данных и многие программные продукты поддерживают данные в этом формате. Таким образом, это позволяет загружать данные, полученные в одном приложении, в другое без преобразований форматов. Библиотека является кроссплатформенной, файлы с данными хранятся в бинарном формате, что уменьшает их объем по сравнению с текстовым форматом, что в итоге ускоряет загрузку.

В комплексе реализована модель представления данных, имеющая возможность частичной загрузки, что позволяет загружать в оперативную память только отдельные фрагменты данных, к примеру, для выбранной части акватории или промежутка времени.

Таким образом, первый слой модели данных базируется на библиотеке netCDF, рис. 1.

Второй слой модели представления данных реализует отображение дискретного набора данных в функцию. В зависимости от исходных данных функция реализует распределение того или иного параметра на географической плоскости. Реализация такого подхода основана на динамическом расчете индексов опорных точек ближайшей ячейки сетки по значению географических координат и последующей интерполяции. Такая

абстракция данных позволяет избежать накладных расходов памяти (так как данные хранятся в виде массивов, а не сложных структур). Кроме того, процедура нахождения индексов линейна и требует минимальных вычислений, позволяя при этом получать значения искомого параметра с любым дискретным шагом. Такой подход важен, в частности, для численных схем, реализующих автоматическую подстройку шага в процессе расчета. Благодаря такому представлению нет необходимости реализовывать интерполяцию данных в численных моделях.

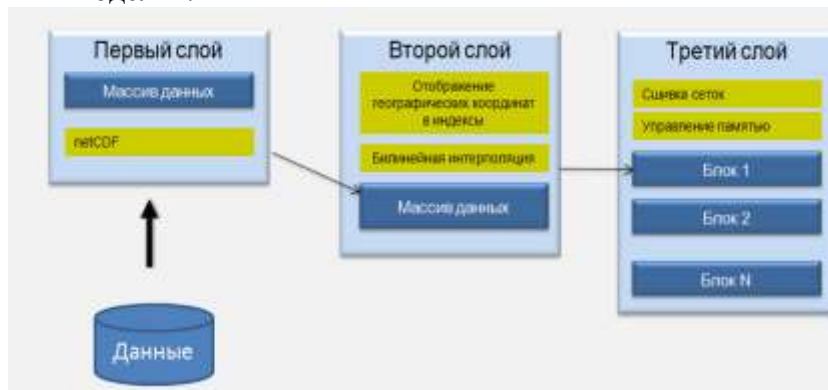


Рис. 1. Структура модели представления данных

Третий уровень представления данных был разработан для двух целей: оптимизации работы с памятью и сшивки сеток. Так, атлас GDEM и, соответственно, рассчитанные на его основе характеристики внутренних волн, имеют различное разрешение – от 1/2 до 1/6 градуса. Имея несколько наборов данных необходимо реализовать переход от одного набора к другому, так чтобы для численной схемы данная операция была прозрачна, то есть необходимо выполнить сшивку сеток.

Пользовательский интерфейс комплекса приведен на рис. 2.

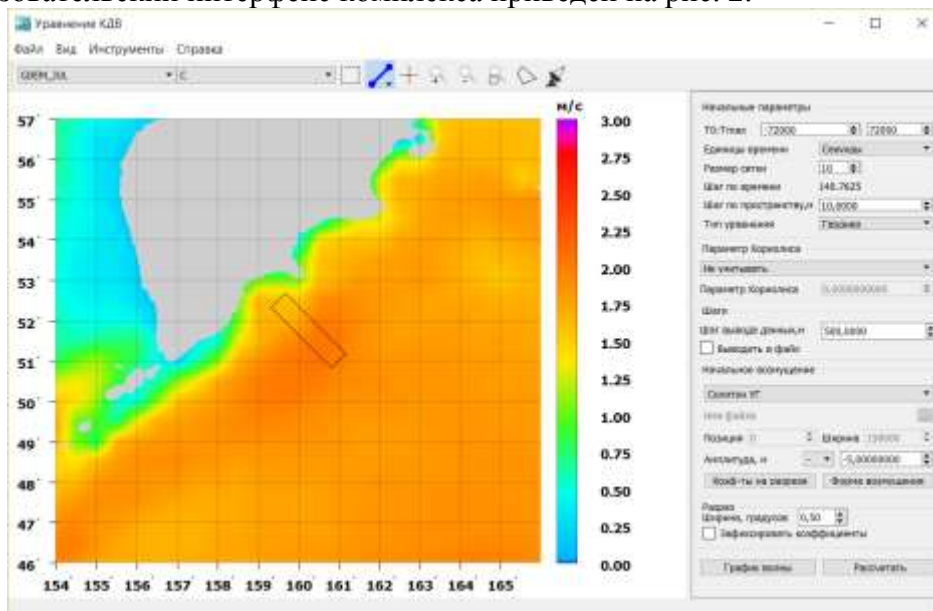


Рис. 2. Пользовательский интерфейс программного комплекса

Использование разнородных данных из различных источников отнимает у исследователей много времени при подготовке и верификации численных экспериментов, а также повышает вероятность ошибки при организации и комбинировании этих данных вручную. При проведении численных экспериментов исследователям приходится работать с такими задачами как приведение исходных данных к одной пространственной сетке, интерполяция данных для адаптации к численным расчетам, многократное создание выборки натуральных данных для генерации оптимальных начальных условий. Автоматизация подобных

процессов с учетом применения современных информационных технологий позволит значительно сократить время и ресурсы, необходимые при проведении таких исследований.

Представленные результаты получены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №17-71-10101).

Список литературы

1. Jackson C.R. An atlas of internal solitary-like waves and their properties//Second ed Global Ocean Associates: 2004, <http://www.internalwaveatlas.com>
2. Полухина, О.Е. Поверхностные волны в стратифицированном океане со сдвигом скорости // Известия Академии инженерных наук РФ. 2001. Т. 2. С. 126-138.
3. Osborne A.R., Burch T.L. Internal solitons in the Andaman Sea // Science. 1980. V. 208. P.451–460.
4. Полухина, О.Е. Обобщенное уравнение Кортевега – де Вриза в теории нелинейных внутренних волн в стратифицированных потоках. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 2002.
5. Кокорина, А.В. Применение псевдоспектрального метода для моделирования диссипации в рамках уравнения Гарднера / А.В. Кокорина, Т.Г. Талипова // Известия Академии инженерных наук РФ. Прикладная математика и механика. 2002. Т. 3. С. 62 – 68.
6. Fofonoff N., Millard R.Jr. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater // UNESCO Technical Paper in Marine Science 44. 1983. P. 15–25
7. T.P. Boyer, J.I. Antonov, H.E. Garcia, D.R. Johnson, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, M.T. Pitcher, O.K. Baranova, I.V. Smolyar, 2006. World Ocean Database 2005. S. Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 60, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 190 pp.
8. Soomere T., Delpeche N., Viikmae B., Quak E., Meier M., Doos K. Patterns of current-induced transport in the surface layer of the Gulf of Finland // Boreal Environment Research. 2001. V. 16. P. 49-63.
9. Teague W.J., Carron M.J., Hogan P.J. A Comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus Climatologies // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. C5. P. 7167 – 7183.
10. Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp, March 2009.
11. NetCDF, University Corporation for Atmospheric, 2012, [Электронный ресурс] <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>

D.Y. Tyugin, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin

SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING, VISUALIZATION AND PROCESSING OF DATA DYNAMICS OF INTERNAL WAVES IN THE STRATIFIED OCEAN

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod

The article presents a software package for researching internal waves in a stratified ocean. The models for describing the dynamics of internal waves are considered. Problems are discussed when carrying out a numerical experiment. The tool for automation of researches is proposed. The aspects of implementation of the program package, three-layer program model of data representation, graphical user interface are considered in detail. The result is a software package that allows numerical modeling of internal wave dynamics in a stratified ocean based on the Gardner equation.

Keywords: software package, Gardner equation, internal waves

Сведения об авторах

Тюгин Дмитрий Юрьевич - к. ф.-м. н., научный сотрудник НИЛ МПнТК НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 8(831)436-63-93, dtyugin@gmail.com.

Куркина Оксана Евгеньевна, к.ф.-м. н. старший научный сотрудник НИЛ МПиТК НГТУ им. Р.Е. Алексеева», 8(831)436-63-93, Oksana.Kurkina@mail.ru.

Кузин Виталий Дмитриевич – студент магистратуры кафедры "Прикладная математика", ИРИТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, chromium32@mail.ru.