

УДК 004.9

Д.Ю. Тюгин, А.А. Куркин, О.Е. Куркина

**ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН
В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ОКЕАНЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изучение геофизических явлений, происходящих в Мировом океане, в том числе на шельфе, является актуальной задачей в рамках освоения природных ресурсов. Одним из основных инструментов при исследовании таких крупномасштабных процессов является математическое моделирование. Для проведения численного эксперимента необходим инструмент, ориентированный на проблемы, решаемые в данной области, а именно учитывающий особенности инициализации моделей, обработки и визуализации данных, доступный для применения без изучения исходного кода. В статье рассматриваются особенности разработки программного комплекса для моделирования внутренних волн на базе слабонелинейной теории. Предложены новые методы для построения программных комплексов, интегрирующих в себе данные, численные модели и средства подготовки данных, использующие контекст для автоматической инициализации численных моделей. Рассматривается набор программных инструментов: инструменты импорта данных, поддержки форматов международных гидрологических атласов, алгоритмов выборки и визуализации данных, блоков расчета полей характеристик внутренних волн для инициализации моделей, средств ввода и автоматической верификации начальных условий, вывода результатов расчета и построения графиков. Показано применение комплекса на примере расчета трансформации и распространения внутренних волн в акватории Балтийского моря.

Ключевые слова: программный комплекс, численное моделирование, пользовательский интерфейс, обработка данных, инициализация моделей, визуализация данных.

Введение

Детальное изучение физических процессов, возникающих на шельфе, прибрежной зоне и материковом склоне является важной задачей для осуществления дальнейшего освоения шельфа Мирового океана. Данные об этих процессах необходимы для безопасного проектирования и строительства гидротехнических сооружений, анализа и повышения продуктивности морских экосистем, поиска и добычи углеводородного сырья и других полезных ископаемых, уменьшения риска загрязнений морской среды.

В качестве одного из таких процессов следует рассматривать распространение и трансформацию внутренних гравитационных волн. Данный тип волн играет важную роль в динамике водных масс и экосистем. Они оказывают значительное влияние на перемешивание водных слоев, суспендирование и перемещение осадочных материалов, размывы дна и, в конечном итоге, формирование рельефа дна шельфовой зоны. Также они существенно определяют распределение питательных веществ и биологическую продуктивность. Течения, индуцированные внутренними волнами, воздействуют на подводные части морских гидротехнических сооружений, усиливая сосредоточенные нагрузки, изгибающие и крутящие моменты и натяжение якоряющих узлов. Кроме того, внутренние волны в значительной мере определяют процессы распространения естественных и техногенных примесей и влияют на качество воды и биопродуктивность морской среды.

Для эффективного исследования динамики внутренних волн необходим инструмент, оптимизированный для выполнения целого класса задач по моделированию внутренних волн и исследованию характеристик и физических полей, формируемых в процессе их распространения в горизонтально неоднородном стратифицированном вращающемся океане.

Существующие программные комплексы с открытым исходным кодом зарубежных разработчиков (MITgcm [1], POM [2], ROMS [3]) созданы с расчетом на более широкий спектр гидродинамических задач, требуют глубоких знаний в области программирования и численных методов. Для инициализации моделей в этих комплексах требуется внешняя подготовка данных. Российские разработки в области вычислительной гидро- и аэродинамики (пакет программ ЛОГОС и др.) не находятся в свободном доступе, ориентированы на промышленность и не поддерживают расчеты в стратифицированной жидкости (только в многофазной).

Таким образом, для решения задачи моделирования внутренних волн необходимо либо разработать свои исходные коды в одном из пакетов моделирования общего назначения, например Матлаб, либо изучить исходный код одного из свободных пакетов для моделирования, найти подходящие данные, обработать их для инициализации модели, провести расчет и проанализировать результаты. Как правило, при численном эксперименте требуется проводить множество расчетов, меняя как начальные условия модели, так и выборку данных для её инициализации. Такой подход отнимает много времени, к тому же изучение исходного кода пакета для моделирования, как и реализация модели с нуля и её верификация требуют значительных усилий и времени, и зачастую создание модели не является целью исследования. Существуют устоявшиеся модели на базе общепризнанных систем уравнений. Поэтому именно результаты моделирования в рамках этих систем уравнений в определенной акватории на базе общедоступных гидрологических атласов либо на базе натурных измерений и их анализ представляют больший интерес.

В этом случае инструмент, интегрирующий в себе общедоступные модели, данные, средства обработки данных для инициализации этих моделей, средства задания начальных условий, средства проведения расчетов и визуализации результатов без изучения исходного кода программного пакета, мог бы повысить эффективность исследований в данной области.

Теоретический анализ

Для описания динамики внутренних волн разработан ряд общепризнанных моделей, применимых к результатам лабораторных экспериментов и к реальным природным условиям. Один класс образуют модели на базе прямого численного интегрирования полных нелинейных систем уравнений Навье-Стокса, двумерных по пространству. Такие модели, как правило, требуют больших вычислительных затрат. Учет в них дополнительных внешних факторов ведет к требованию учета третьей пространственной координаты и поэтому затруднителен. Другой класс моделей базируется на слабонелинейной теории длинных (по сравнению с глубиной жидкости) волн. В этом случае динамика волн описывается одномерным эволюционным уравнением Кортевега – де Вриза (КдВ). Коэффициенты уравнения определяются распределением плотности по глубине, горизонтального сдвигового течения и условиями на поверхности. К преимуществам данного класса моделей, в отличие от полнонелинейных, относится меньшая вычислительная сложность, возможность обобщения для горизонтально неоднородной жидкости. Для описания волн больших амплитуд уравнение КдВ может быть уточнено путем учета поправок следующих порядков малости. В таком случае подходящим является уравнение Гарднера [4] (уравнение Кортевега – де Вриза с комбинированной нелинейностью):

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

где η – смещение изопикнической поверхности в максимуме вертикальной моды; коэффициенты c , α , α_1 и β определяются стратификацией плотности и глубиной океана (c – фазовая скорость длинных линейных внутренних волн, α – коэффициент квадратичной нелинейности, α_1 – коэффициент кубической нелинейности, β – коэффициент дисперсии). Выражения для расчета коэффициентов подробно описаны в [5, 6].

Учет горизонтальной неоднородности жидкости и глубины бассейна приводит к изменчивости коэффициентов уравнения (1) вдоль направления распространения волны, в этом случае динамика волн может быть описана обобщенным уравнением Гарднера на случай плавно неоднородной среды [7]. Оно имеет вид:

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

где $\xi(x, s) = \frac{\eta(x, s)}{Q(x, x_0)}$, s – координата с сопровождающей волну системе отсчета вдоль трассы,

$s = \int \frac{dx}{c(x)} - t$, Q – фактор усиления.

Для учета вращения океана уравнение Гарднера может быть дополнено. В этом случае может использоваться уравнение Гарднера-Островского [8], записанное для неоднородной среды (3):

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} + \left(\frac{\alpha(x)Q}{c^2(x)} \xi + \frac{\alpha_1(x)Q^2}{c^2(x)} \xi^2 \right) \frac{\partial \xi}{\partial s} + \frac{\beta(x)}{c^4(x)} \frac{\partial^3 \xi}{\partial s^3} = \frac{f^2}{2c(x)} \int \xi ds, \quad (3)$$

где f – параметр Кориолиса, $f = (4\pi/T_e) \sin(\varphi)$, T_e – период вращения Земли, φ – географическая широта.

Уравнения (1) – (3) реализованы в виде расчетных модулей программного комплекса, на базе неявной псевдоспектральной схемы [9].

Разработка программного комплекса

Для инициализации модели на основе уравнений КдВ-типа были использованы международные гидрологические атласы – WOA (World Ocean Atlas) [10], GDEM (Generalized Digital Environmental Model) [11]. Береговая линия задана на основе данных атласа батиметрии высокого разрешения ETOPO1 [12], с 1-минутной сеткой. Гидрологические атласы содержат пространственно-временные профили температуры и солености воды. Эти данные используются в комплексе для расчета профилей плотности, частоты Брента-Вайсяля и полей характеристик внутренних волн (коэффициенты уравнения Гарднера). Архитектура программного комплекса представлена на рис. 1.

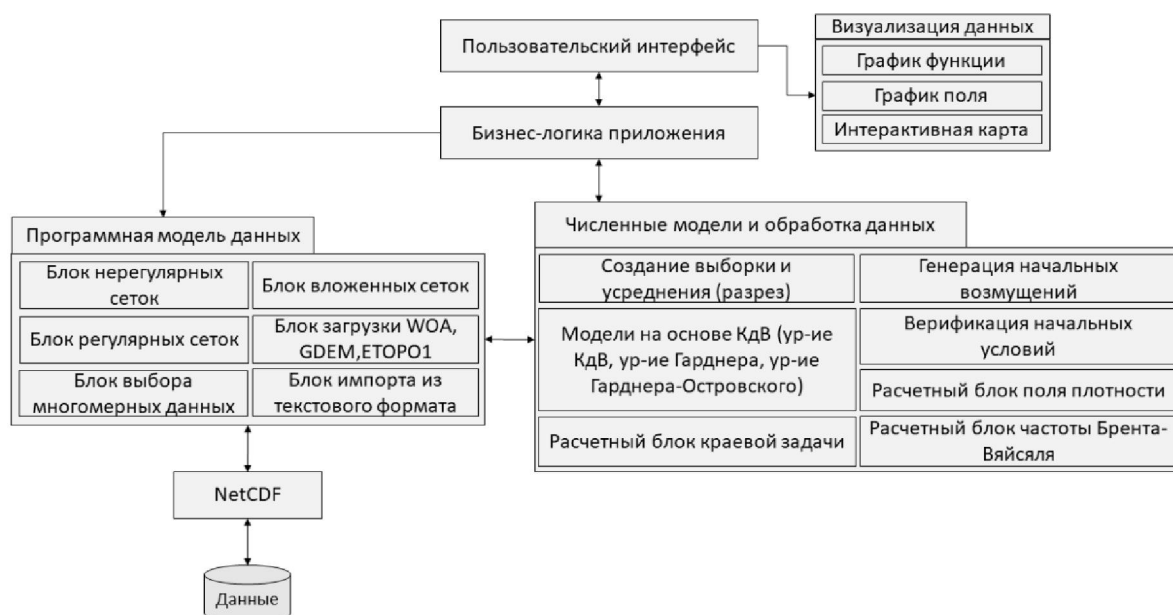


Рис. 1. Архитектура программного комплекса

Основой для хранения данных является библиотека NetCDF [13]. Данная библиотека широко распространена в научном сообществе, часть данных в открытых источниках уже описывается в формате NCF. Для загрузки данных в текстовом формате предусмотрен блок импорта из текстовых данных, конфигурируемый при помощи пользовательского интерфейса. Таким образом, он не зависит от конкретных данных, а может быть настроен пользователем. Данные приводятся к единому формату NCF, затем загружаются в память. Формат NCF позволяет описывать многомерные данные и сохранять их описание вместе с самими данными, в том числе различную служебную информацию о названии физических полей, единиц измерения и опорных точек сетки. Таким образом, загрузка открытых источников может быть выполнена путем сопоставления названий переменных и проверки единиц измерения. Для этого предусмотрены наборы описаний для атласов WOA и ETOPO1. Пользовательский интерфейс комплекса представлен на рис. 2.

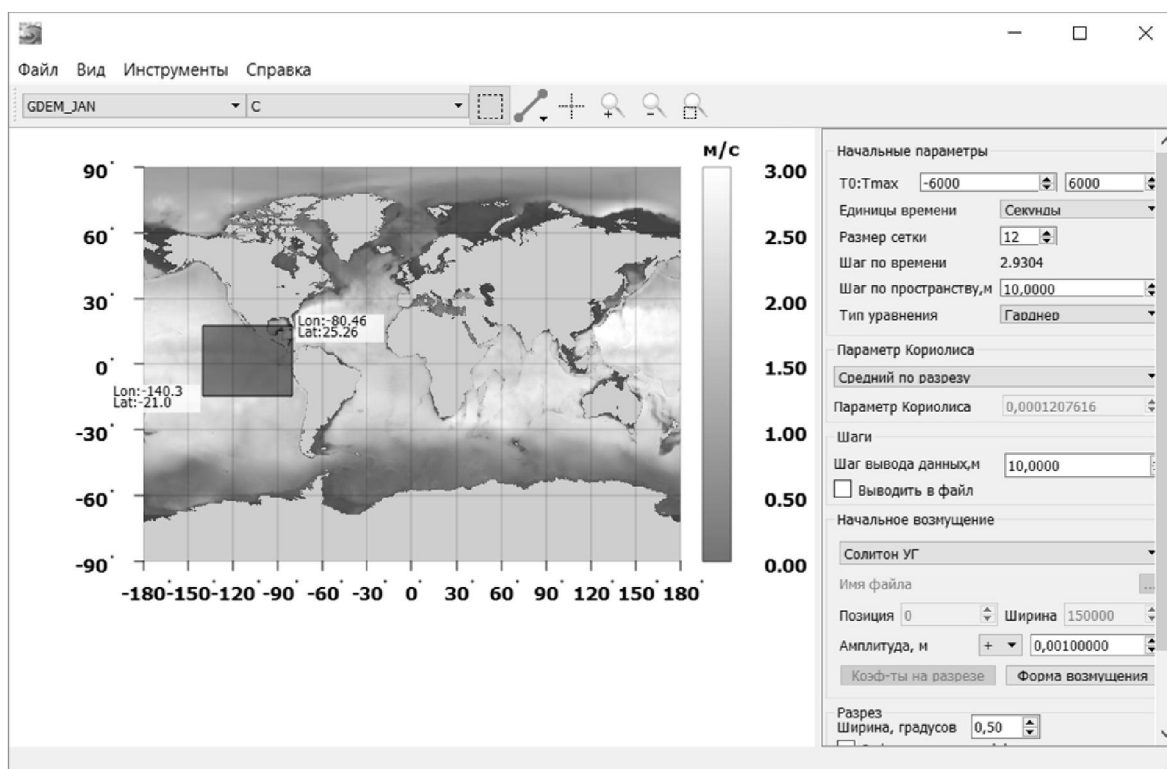


Рис. 2. Пользовательский интерфейс

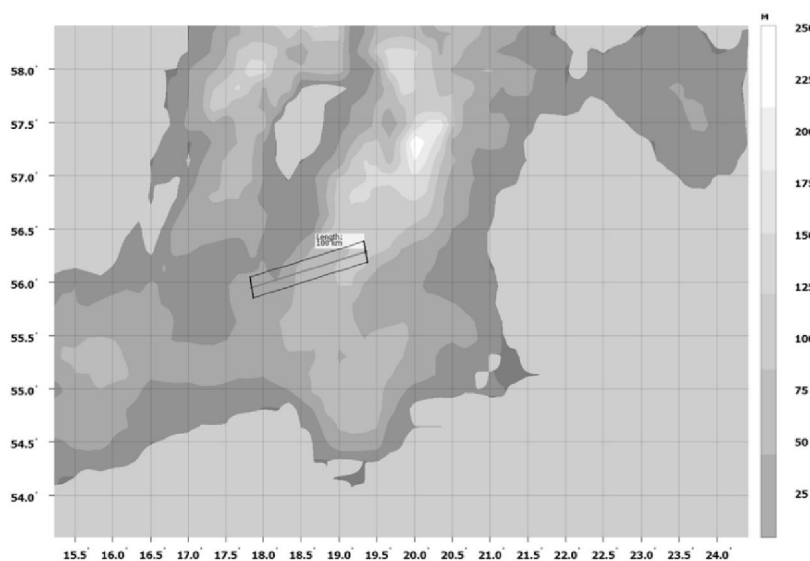


Рис. 3. Инструмент для задания выборки данных

Применение комплекса не требует изучения его исходного кода и компиляции. Задание начальных условий частично автоматизировано на основе контекста данных для инициализации модели. Так, выборка данных для инициализации модели привязана к географической карте, рис. 3.

Поэтому часть параметров, например, параметр Кориолиса в уравнении Гарднера-Островского может быть получен из координат разреза. Задание амплитуды начального возмущения для некоторых типов уравнений может быть выполнено более точно, с учетом ограничений, исходящих из аналитической оценки в рамках слабонелинейной теории [14]. Так, задание начального возмущения для расчетов в рамках уравнения Гарднера может быть уточнено в том случае, если начальным возмущением является солитон уравнения Гарднера. Если параметр кубической нелинейности отрицателен, то возможны солитоны одной полярности (определяется знаком параметра квадратичной нелинейности) и ограниченные амплитудой:

$$a_{\text{lim}} = -\alpha/\alpha_1. \quad (4)$$

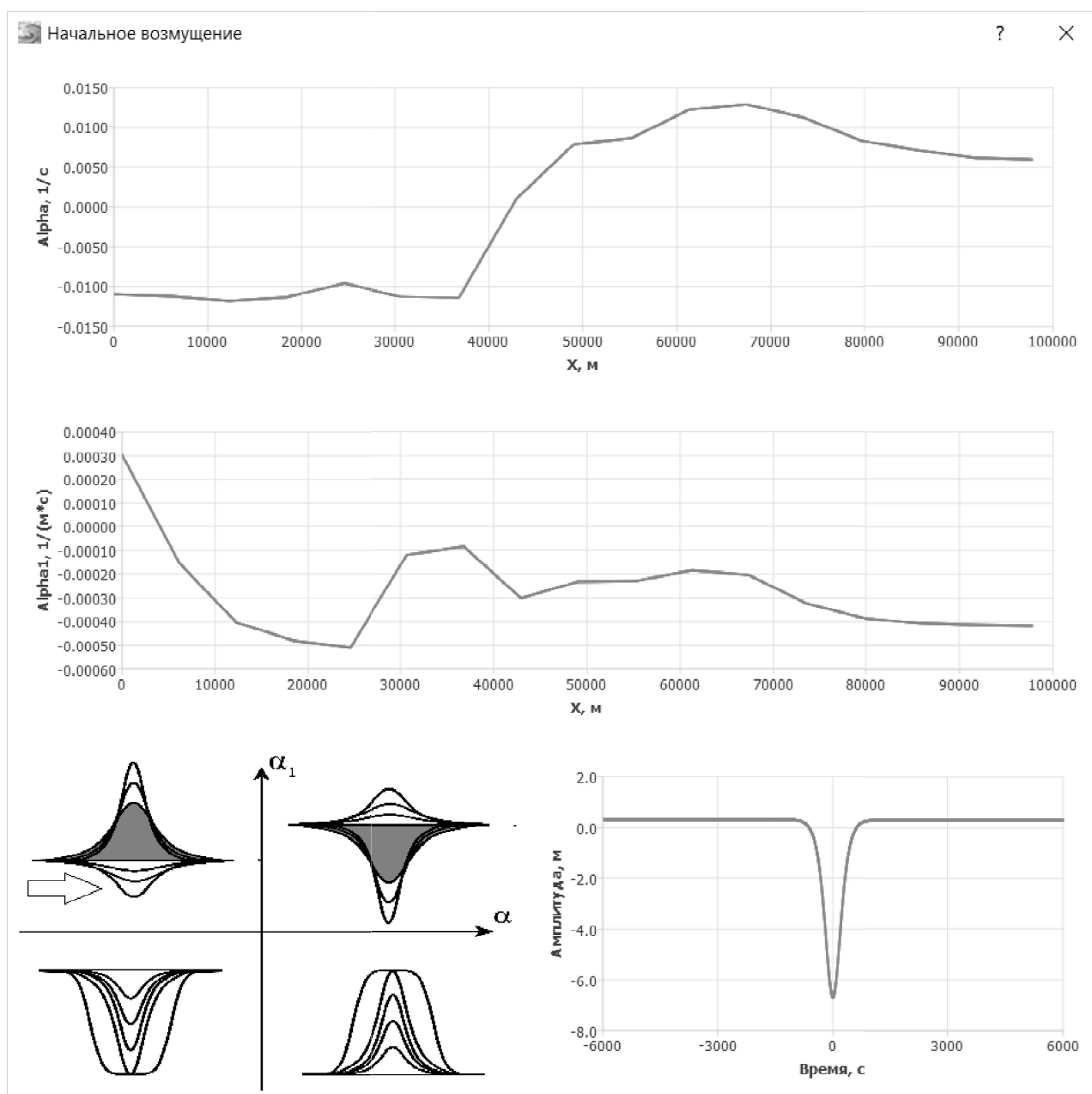


Рис. 4. Анализ входных параметров для задания начального возмущения

Если параметр кубической нелинейности положителен, то существуют две ветки солитонных решений и ветка противоположной знаку α полярности ограничена по амплитуде снизу амплитудой алгебраического солитона (5)

$$a_{\text{alg}} = -2\alpha/\alpha_1. \quad (5)$$

Данная проверка выполняется в комплексе автоматически, пользователь получает подробный анализ (рис. 4).

Эксперимент

Рассмотрим расчет динамики внутренних волн на базе уравнения Гарднера, в качестве начального возмущения задан солитон уравнения Гарднера, с амплитудой -7 метров. Для инициализации модели используется разрез, показанный на рис. 3, 4. В начальной точке параметры $\alpha_1=0.0003$, $\alpha=-0.01$, ограничение амплитуды отсутствует, так как ветка солитонных решений находится во втором квадранте и начальное возмущение отрицательно (рис. 4).

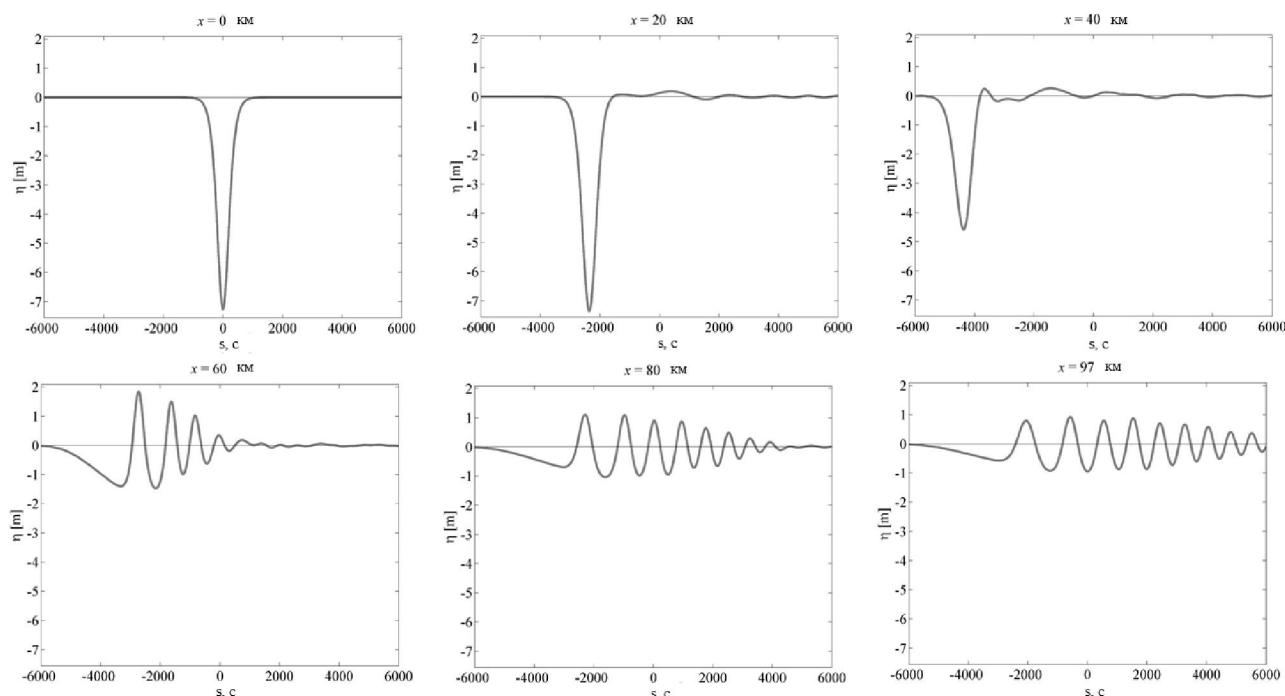


Рис. 5. Результаты моделирования динамики внутренних волн

На рис. 5 представлена трансформация солитона. Солитон отрицательной полярности адиабатически меняется до точки трассы $x = 40$ км. Затем параметр α меняет знак, и солитон трансформируется в цуг волн положительной полярности.

Заключение

Разработан программный комплекс, ориентированный на решение задачи моделирования внутренних волн в стратифицированном океане на базе слабонелинейной теории. Он включает моделирование на основе уравнений Гарднера и Гарднера-Островского с учетом сил Кориолиса. Для поддержки проведения численного эксперимента в комплексе реализован набор инструментов, включая инструменты импорта данных, поддержки форматов международных гидрологических атласов, алгоритмов выборки и визуализации данных, блоков расчета полей характеристик внутренних волн для инициализации моделей, средств ввода и автоматической верификации начальных условий, вывода результатов расчета и построения

графиков в различных проекциях. Показано применение комплекса на примере расчета трансформации и распространения внутренних волн в акватории Балтийского моря.

Разработанный комплекс содержит все необходимые компоненты для проведения численных экспериментов в любой области мирового океана на базе слабонелинейной теории без написания дополнительного программного кода. В результате изучение внутренних волн, во-первых, может проводиться пользователями без знаний в области программирования, а во-вторых, наличие такого инструмента значительно экономит время на адаптацию данных и численных схем, что повышает эффективность исследований.

Переход от набора исходных кодов и разрозненных данных к программному продукту, интегрирующему в себе данные, алгоритмы обработки и численные модели, позволяет перейти к технологии для исследования внутренних волн.

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

Библиографический список

1. **Marshall, J.** Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling / J. Marshall, C. Hill, L. Perelman, A. Adcroft // J. Geophysical Res. – 1997. – V. 102. – P. 5733–5752.
2. **Blumberg, A.** A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // A. Blumberg, G. Mellor // Dynalysis of Princeton. 1987. – P. 1–16.
3. **Melsom, A.** Using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) to improve the ocean circulation from a GCM 20th century simulation / A. Melsom, V. Lien, W. Budgell // Ocean Dynamics. – 2009. – P. 969–981.
4. **Полухина, О.Е.** Обобщенное уравнение Кортевега – де Вриза в теории нелинейных внутренних волн в стратифицированных потоках: дисс. ... на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – 2002. – С. 109–130.
5. 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.
6. **Pelinovsky, E.** Internal solitary waves / E. Pelinovsky [et al.] // Ch. 4. Solitary Waves in Fluids. WIT Press. Southampton. Boston. – 2007. – P. 85–110.
7. **Holloway, P.** A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf / P. Holloway [et al.] // J. Phys. Oceanogr. 27/6. 1997. P. 871–896.
8. **Grimshaw, R.** Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration / R. Grimshaw [et al.] // Nonlin. Processes Geophys. – 2010. – V. 17. – P. 633–649.
9. **Кокорина, А.В.** Применение псевдоспектрального метода для моделирования диссипации в рамках уравнения Гарднера / А.В. Кокорина, Т.Г. Талипова // Известия Академии инженерных наук Российской Федерации. Прикладная математика и механика. – 2002. – Т. 3. – С. 62–68.
10. **Boyer, T.P.** World Ocean Database 2005 / T.P. Boyer [et al.]. – Washington: U.S. Government Printing Office. 2006. 190. P.
11. **Teague, W.J.** A Comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus Climatologies // W.J. Teague, M.J. Carron, P.J. Hogan // J. Geophys. Res. 1990. – V. 95. – P. 7167–7183.
12. **Amante, C.** ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis / C. Amante, B. Eakins // NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. – 2009. 19. P.
13. NetCDF. URL: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf>
14. **Kurkina, O.E.** Nonlinear Dynamics of Internal Gravity Waves in Shallow Seas // PhD Thesis. – 2012. P. 26–28.

*Дата поступления
в редакцию 30.04.2018*

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

**PROBLEM-ORIENTED SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING DYNAMIC
OF INTERNAL WAVES IN THE STRATIFIED OCEAN**

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. Alekseev

Purpose: Proposed a new software package for researching dynamic internal waves in the World Ocean.

Design/methodology/approach: A theoretical framework based on weak non-linear theory. A set of models based on KdV equations was implemented. A set of tools for data processing, models initialization, results visualization and analysis were implemented. The software package provides ability to conduct internal waves modeling without source code knowledge and manual data preprocessing unlike other widely used software packages.

Findings: The proposed approaches for automated models initialization using built-in datasets and data context can be used in other applications related with geophysical processes modeling.

Research limitations/implications: The present study is a starting point for extending the software package with additional models and data sets which allow more detailed research of internal waves and theories comparison.

Key words: software package, numeric modeling, user interface, data processing, model initialization, data visualization.