УДК 532.5

РАЗРАБОТКА ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПОЛЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Тюгин Д.Ю.[1], Авербух Е.Л.[1], Куркина О.Е.[1,2], Куркин А.А.[1]

[1]*Нижегородский государственный технический университет им Р.Е.Алексеева, Н.Новгород, Россия*
[2]*Национальный исследовательский университет - Высшая школа экономики, Н.Новгород, Россия*

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации мероприятия 1.3.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы и гранта РФФИ 10 05 00199а.

АННОТАЦИЯ

В данной статье представлен программный комплекс, предназначенный для численного моделирования распространения антропогенних загрязнений и примесей в поле внутренних волн. Модель расчета примесей основана на уравнении баланса поверхностной концентрации, она реализована с помощью неявного метода конечных разностей и протестирована на ряде аналитических решений уравнения адвективно-диффузионного переноса примесей. Поле внутренних волн задается на основе уравнения Гарднера-Островского с учетом сил Кариолиса в стратифицированном басейне. Исходными данными для расчета приповерхностных скоростей являются характеристики внутренних волн, рассчитанные на основе международного атласа гидрологических параметров GDEM и базы батиметрии ETOPO1.

ВВЕДЕНИЕ

Возрождение интереса к динамике примесей связанно с увеличением загрязнения Мирового океана, а так же с проблемой дистанционного зондирования океана и необходимостью интерпретировать получаемые при этом радиолокационные изображения. В ходе изучения пленочных сликов стало понятно, что их формирование связанно с перераспределением концентрации загрязняющих веществ под воздействием переменных течений, обусловленных различными динамическими процессами.

Нелинейные волновые движения в стратифицированных потоках характеризуются многомодовым составом и большим разнообразием режимов и форм: от распространяющихся и стоячих волн до локализованных (солитоноподобных и короткоживущих волн большой амплитуды), включая их всевозможные нелинейные суперпозиции. Точное описание возмущений большой амплитуды является наиболее важным практически, поскольку интенсивные волны значимы не только из-за большой заключенной в них энергии, но и из-за их нелинейной природы, делающей их динамику более сложной. Отдельного внимания в этом контексте заслуживают локализованные возмущения, которые в слабонелинейном пределе описываются фундаментальными неизлучающими решениями (солитонами и бризерами) соответствующих упрощенных моделей – эволюционных уравнений.

Такие интенсивные возмущения необходимо наиболее детально исследовать как самостоятельно, так и в проекции на кинематические и динамические характеристики процессов их распространения, поскольку с точки зрения практики, они являются важным источником сильных течений, вертикального перемешивания и эрозии дна, прохождение

внутренних солиборов может приводить к стократному увеличению диффузии и перемешивания через термоклин, вносить вклад в создание сдвигов скорости и неустойчивости в придонном слое жидкости. Особо стоит отметить их роль в перераспределении антропогенных загрязнений и примесей в контексте распознования радиолокационных снимков морской поверхности для задач снижения риска и уменьшения последствий разливов загрязняющих веществ.

Одним из интенсивно используемых методов при изучении масштабных геофизических процессов является численное моделирование. Расчетные методы исследования позволяют проводить сложные физические эксперименты. Этому также способствует возрастающая производительность вычислительных систем и современных прикладных программ. Тем не менее, задача написания программного обеспечения, как правило, возникает достаточно часто.

На базе программного комплекса IGWResearch [1,2] был разработан пакет прикладных программ для численного моделирования распространения примесей и загрязнений в поле внутренних волн на основе атласов гидродинамических параметров.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В основе разработанного комплекса прикладных программ лежит слабонелинейная теория длинных одномодовых внутренних волн (ВВ) в стратифицированном океане описывается в рамках нелинейного эволюционного уравнения Кортевега–де Вриза с комбинированной нелинейностью и учетом сил Кориолиса, также известное как уравнение Гарднера–Островского [3]:

$$\xi_X + \left(\frac{\alpha(X)Q}{c^2(X)}\xi + \frac{\alpha_1(X)Q^2}{c^2(X)}\xi^2 \right)\xi_s + \frac{\beta(X)}{c^4(X)}\xi_{sss} = \frac{f^2}{2c(X)}\int \xi ds \quad (1)$$

где $\xi(s,X) = \eta(s,X)/Q(X)$, η – является смещением изопикнической поверхности в максимуме вертикальной моды, $s = \int dX / c(X) - t$ время в сопровождающей системе отсчета, X – координата вдоль пути распространения волны, c – фазовая скорость длинных линейных ВВ, α – коэффициент квадратичной нелинейности, α_1 – коэффициент кубической нелинейности, β – коэффициент дисперсии, Φ(z) – функция, описывающая вертикальную структуру ВВ, Q – коэффициент линейного усиления, находимый из естественного условия сохранения потока энергии в неоднородной среде, f – параметр Кориолиса ($f = 2\,\Omega_E \sin\varphi$, $\Omega_E = 0.00007292$ 1/c – частота вращения Земли, φ – географическая широта). Это уравнение является неинтегрируемым и не имеет локализованных стационарных решений в диапазоне параметров, соответствующих ВВ. Начальное условие для такой задачи задавалось в виде солитона уравнения Гарднера [4].

Решение граничной задачи проводилось с помощью численного интегрирования уравнения Гарднера-Островского (1) с переменными коэффициентами. Моделирование производилось с помощью неявной псевдо-спектральной схемы [5]. Полученный набор профилей амплитуды использовался для расчета поля приповерхностных скоростей.

В качестве основы исследования динамики пленочных загрязнений было использовано уравнение баланса поверхностной концентрации Γ (X, t) [6]:

$$\Gamma_t + div(\vec{u}\Gamma) = D\Delta\Gamma + (\Gamma_0 - \Gamma)/\tau, \quad (2)$$

где $\vec{u}$ – поверхностная скорость ВВ. Параметр D есть коэффициент горизонтальной (поверхностной) диффузии, а τ – характерное время релаксации пленки, описывающее процессы обмена с более глубокими слоями воды, Γ_0 – равновесная концентрация пленки на поверхности раздела вода-воздух (в отсутствие течения). Было также использовано периодическое граничное условие.

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Программный комплекс состоит из расчетных блоков, блока хранения и доступа к даннм, графического пользовательского интерфейса и блока визуализации, рис.1. Блок хранения данных позволяет загружать массивы коэффициентов во внутренние структуры

комплекса, а также при необходимости, вырезать отдельную область и экспортировать данные в текстовые файлы. Блок доступа к данным обеспечивает поддержку доступа с произвольным шагом, интерполируя значения на основе опорных узлов исходной сетки на лету. Таким образом, численные схемы, применяемые в расчетных блоках комплекса, абстрагированы от ограничения по шагам.

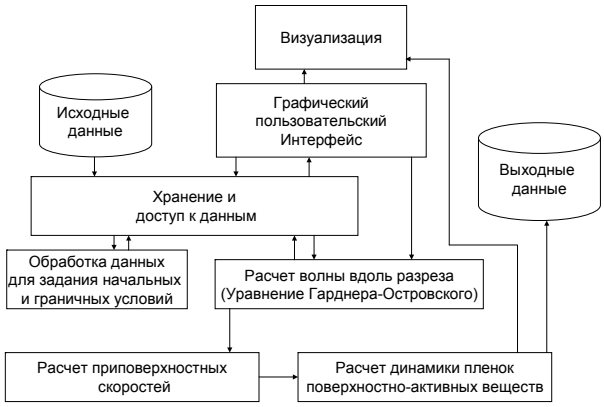

Рис.1 Архитектура программного комплекса.

Тем не менее, при задании начальных параметров, необходимо оценивать разрешение сетки на расчетной области. Так, атлас GDEM[7] имеет различное фактическое разрешение сетки данных, и, не смотря на интерполяцию, не имеет смысла задавать слишком малый начальный шаг, так как это может значительно замедлить расчеты. Поэтому, в блоке доступа к данным реализованы интерфейсы предоставляющие информацию о разрешении сетки в различных областях. В графическом интерфейсе для этого реализован режим просмотра разрешения сетки, что в конечном итоге, позволяет визуально оценить разрешение в отдельных акваториях.

Для визуализации результатов моделирования был реализован набор компонентов: Plot, GeoPlot. Первый компонент позволяет визуализировать пространственно-временные диаграммы распределения концентрации пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ). С помощью компонента GeoPlot осуществляется навигация по географической карте для выбора интересующей области, а также интерактивного задания параметров. Так для выбора разреза, вдоль которого проводится моделирование, пользователь может либо ввести координаты, либо выбрать мышью линию на карте, рис.2.

Для этого реализован блок задания начальных и граничных условий. С его помощью осуществляется поддержка корректности выбранных значений. При выборе разреза пересчитывается его длина, а также выводится предупреждение, если его часть оказывается на суше. После выбора разреза запускается процедура определения диапазона возможной начальной амплитуды смещения водной поверхности. Благодаря этому пользователь получает средства поддержки проведения численного эксперимента, тогда как во многих доступных комплексах для моделирования, такие средства не предусмотрена и при выборе неверных параметров численная схема разваливается в процессе расчета.

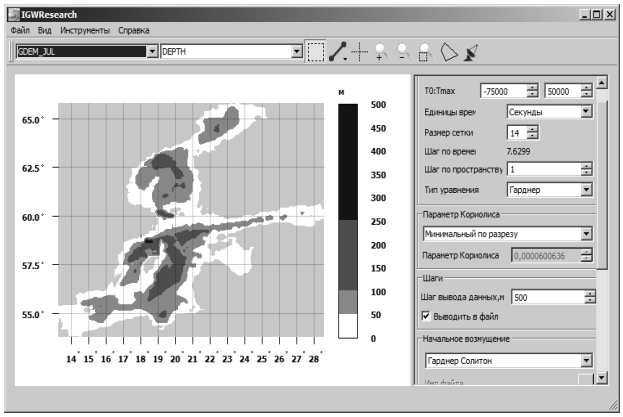

Рис.2 Внешний вид графического пользовательского интерфейса.

Расчет концентрации пленок поверхностно-активных веществ осуществляется в три этапа. На первом этапе происходит задание параметров пользователем и их проверка, загрузка массивов коэффициентов уравнения Гарднера-Островского для выбранной географической области. На втором этапе проводится расчет эволюции волны вдоль разреза. После этого на основе полученных результатов рассчитываются значения приповерхностных скоростей. Результаты, представленные в виде графиков значений смещения водной поверхности и величин скоростей, выводятся в графический интерфейс. На данном этапе может быть проведен промежуточный анализ. Последний этап состоит из расчета концентрации ПАВ. Результаты выводятся в виде пространственно-временных диаграмм и могут быть экспортированы в текстовый файл.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходные данные атласа GDEM были получены из открытых источников и предварительно обработаны. Атлас GDEM V 3.0 представляет собой массивы усредненных и сглаженных данных натурных измерений температуры, солености и других гидрологических параметров Мирового океана. На основе этого атласа были рассчитаны коэффициенты уравнения Гарднера-Островского. Для задания береговой линии использовалась батиметрическая база ETOPO1 [8] с 1-минутным разрешением. В численном эксперименте использовались гидрологические данные за июльский период, разрешение сетки для акватории Балтийского моря составило 1/6 градуса.

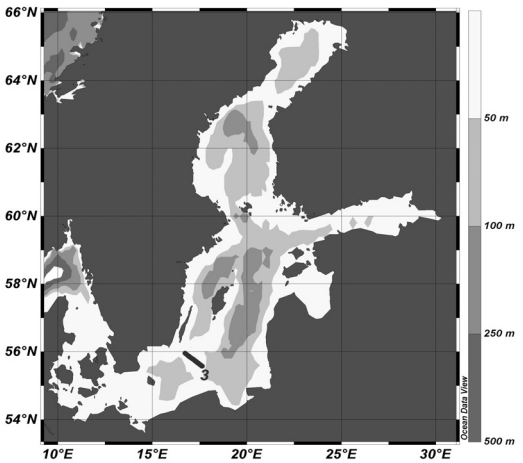

Рис.3 Батиметрия Балтийского моря с обозначением разреза.

Для практических расчетов были выбраны условия разреза в Балтийском море, показанного на карте на рис.3. Аномалия плотности и переменные параметры среды, используемые для моделирования уединенных ВВ согласно (1), соответствующие разрезу, изображены на рис.3. Плотность рассчитывалась на основе международного уравнения состояния морской воды [9].

Выбранный разрез длиной 70 км имеет глубины в диапазоне 25 – 50 м и характеризуется ярко выраженной зоной «горки» с уменьшением глубины (с 30 до 60 км трассы). Коэффициент линейного усиления Q, равный 1 в начальной точке разреза, существенно увеличивается до значения 1.4 к 50-му километру трассы, затем спадает, пересекая единичное значение линейного усиления в точке X = 63 км. Уменьшение значения коэффициента Q продолжается до конца рассматриваемого участка, достигая 0.8 к конечной точке.

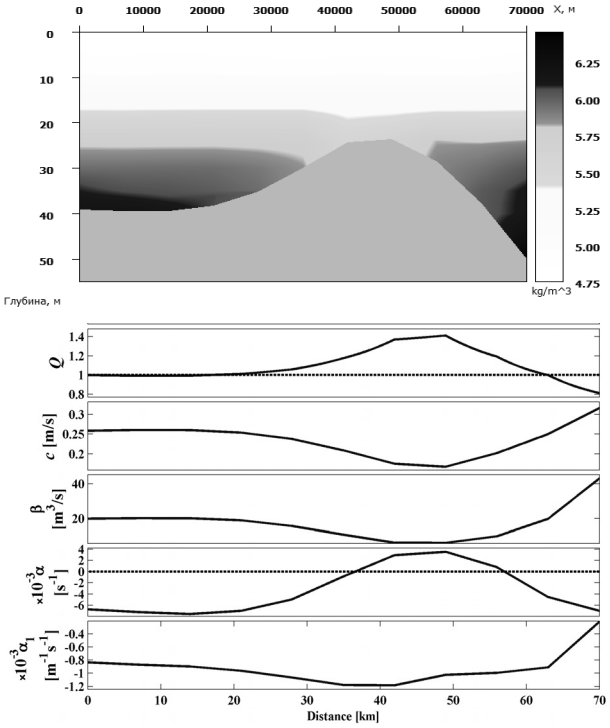

Рис.4 Аномалия плотности [кг/м^3] (сверху) и параметры уравнения (1) (снизу) вдоль трассы в Балтийском море.

Линейные параметры ВВ – фазовая скорость с длинных волн и параметр дисперсии β в целом хорошо коррелируют с глубиной, уменьшаясь, начиная с 20 км. Нелинейные параметры α и α_1 очень чувствительны к стратификации, поэтому их максимумы и минимумы не совпадают с соответствующими пиками у коэффициента линейного усиления, фазовой скоростью и параметром дисперсии. Параметр квадратичной нелинейности α отрицателен в начальной точке разреза и имеет значение $6\cdot10^{-3}$ 1/с и сохраняет свой знак до точки 36 км. Максимально он достигает $4\cdot10^{-3}$ 1/с принимает отрицательные значения после X = 58 км на рассматриваемом разрезе. Параметр кубической нелинейности отрицателен на протяжении длины трассы, достигает своего минимума при значении $-1.2\cdot10^{-3}$ 1/(м·с) и принимает значение $-0.3\cdot10^{-3}$ 1/(м·с) к концу трассы. Так как $\alpha < 0$, и $\alpha_1 < 0$ в начальной точке трассы, здесь возможна только одна ветка солитонного решения уравнения Гарднера с

фиксированными коэффициентами. В качестве начального условия в точке X = 0, мы выбрали решение сответствующее солитону отрицательной полярности, амплитуда которого равна − 5 м. Он был сдвинут на постоянный пьедестал, высота которого выбиралась из условия равенства нулю массы начального возмущения, для согласования с уравнением (1). Трансформация такого возмущения (пересчитанного в поле горизонтальной скорости на поверхности) на неоднородном разрезе и под действием вращения Земли показана на рис.5 в исходных координатах (t, X) с учетом периодичности граничных условий.

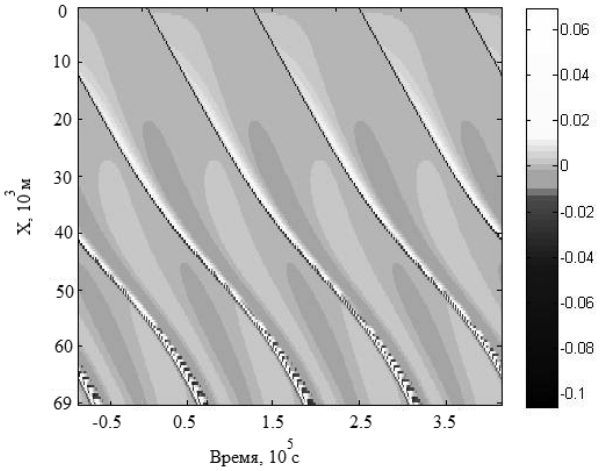

Рис.5 Распределение скоростей вдоль трассы в Балтийском море (м/с).

На основе полученного распределения скоростей внутренней волны было проведено численное моделирование динамики пленок поверхностно-активных веществ и примесей в рамках модели адвекции, дополненной диффузионными и релаксационными слагаемыми. Было произведено моделирование различных наборов параметров. Представим распределение концентрации пленки для модели адвекции-диффузии-релаксации с параметрами D = 100 м²/с, τ = 0.5 ч (рис.6).

За счет воздействия вращения Земли (силы Кориолиса) и переменных коэффициентов уравнения (1) (случай, наиболее близкий к реальности) поле концентрации становится все более неоднородным, и можно отметить совместное влияние этих эффектов в виде увеличения дисперсионных эффектов и рефракции ВВ с соответствующем изменением геометрии пленки. Отметим проявления релаксационных и диффузионных процессов, приводящих к уменьшению отклонения концентрации от равновесного значения. Интересным представляется случай взаимодействия пленочного следа повышенной концентрации с пленочным образом распространяющихся ВВ, имеющим пониженный уровень концентрации. С учетом диффузии и релаксации с выбранными значениями коэффициентов отклонения концентрации не превышают 6% от первоначального уровня.

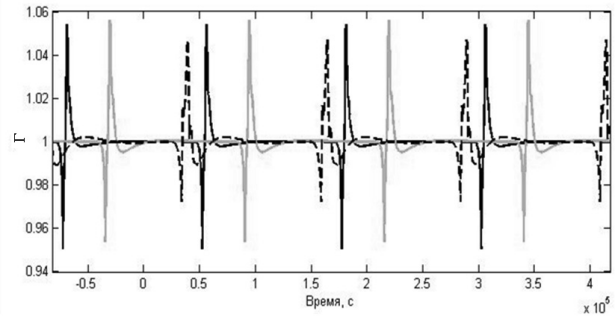

Рис.6 Уровень концентрации в фиксированной точке пространства с течением времени: черный x=15 км, серый x=25 км, пунктир x=40 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено исследование пространственной структуры уединенных ВВ, полученных путем численного интегрирования уравнения Гарднера-Островского (с учетом вращения Земли) на основе программного комплекса «IGW Research». Рассмотрен разрез в Балтийском море, данные о морской стратификации которого получены из базы данных GDEM. Было оценено взаимное влияние неоднородности среды и сил Кориолиса на динамику ВВ и их поверхностные проявления, расчет которых основан на уравнении баланса поверхностной концентрации пленок ПАВ. Результаты проводимых исследований могут быть использованы при анализе РЛИ морской поверхности для интерпретации визуализируемых на них явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюгин Д.Ю., Куркина О.Е., Куркин А.А. Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2011. Т. 4, № 2 – СПб.:Наука, 2011. С. 32 – 44.
2. Электронный атлас кинематических и нелинейных параметров внутренних гравитационных волн в Мировом океане // Датчики и системы, 2011. № 12. С. 49-52
3. 20.Grimshaw R., Talipova T., Pelinovsky E., Kurkina O. Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration // Nonlin. Processes Geophys., 633-649, doi:10.5194/npg-17-633-2010, 2010
4. Kakutani T., Yamasaki N.Solitary waves in a two–layer fluid // J. Phys. Soc. Japan. 1978. V. 45, p.674–679.
5. Fornberg B. A practical guide to pseudospectral methods // Cambridge Univ. Press, 1998, 231 p.
6. Полухина О.Е., Талипова Т.Г. Численное моделирование динамики пленок поверхностно-активных веществ в поле нестационарных неоднородных течений и волн // Известия Академии инженерных наук РФ, Т.3, 2002, с.3 – 11
7. 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.
8. Amante, C. and B. W. Eakins, ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp, March 2009.
9. Fofonoff, N., Millard, R.Jr. Algoriths for computation of fundamental properties of seawater// UNESCO Technical Paper in