

хотя их показатели и очень близки. Именно поэтому это было сложно определить априорно. Из рис. 2 видно, что в интервале размерности задачи 2^8-2^{11} оптимальное ускорение достигается на двух вычислителях, после этого интервала размерности – на максимальном количестве вычислителей. Для данной системы $p=10$.

Схематически разработанную библиотеку можно представить следующим образом (рис. 4).

Библиотека была разработана и апробирована под управлением операционной системы ASPLinux на ядре 2.4.20-9asp, компилировалась компилятором gcc 3.2.2.

Основная цель, которую реализует библиотека, – максимально эффективно решить поставленную задачу, зная ее размерность, данные и тип. Для выбора оптимального алгоритма и параметров решения входной задачи была разработана оболочка, которая производит определение характеристик используемой вычислительной системы для вычисления коэффициента k и последующий анализ по выбору параметров для оптимального решения задачи.

Результаты работы внедрены в научно-образовательном центре математического моделирования и геоэкологической безопасности при разработке комплекса программ оперативного прогноза в задачах водной экологии на кластере распределенных вычислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухинов А.И. Двумерные схемы расщепления и некоторые их приложения. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 408 с.
2. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.

УДК 518.5

А.Е. Чистяков, Е.В. Алексеенко, О.В. Колгунова

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МАТЕМАТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА В МЕЛКОВОДНЫХ ВОДОЕМАХ

Азовское море расположено на юго-западе России и имеет максимальную протяженность с севера на юг ≈ 250 км, с запада на восток ≈ 350 км, а максимальную глубину 15 м. Программный комплекс предназначен для оценки и прогнозирования состояния водной среды водоема. Математическое описание основано на выделении осредненных составляющих параметров течения среды (скорости, давления). Уравнения модели движения жидкости рассматриваются в прямоугольной области геоинформационной системы Азовского моря с шагом по горизонтальным координатам направлениям 1000 м и 1 м по вертикальному. Направление осей Ox и Oy горизонтально с запада на восток и с севера на юг соответственно. Ось Oz направлена вертикально вниз.

Исходными уравнениями гидродинамики являются [1]:

– уравнение движения (Навье–Стокса)

$$u'_t + uu'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho} P'_x + (\mu u'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (\mu w'_z)'_z + 2\Omega(v \sin \theta - w \cos \theta), \quad (1)$$

$$v'_t + uv'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho} P'_y + (\mu v'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (v v'_z)'_z - 2\Omega u \sin \theta, \quad (2)$$

$$w'_t + uw'_x + vw'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho} P'_z + (\mu w'_x)'_x + (\mu w'_y)'_y + (v w'_z)'_z + 2\Omega u \cos \theta + g; \quad (3)$$

– уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости

$$u'_x + v'_y + w'_z = 0. \quad (4)$$

Полное гидродинамическое давление связано с глубиной соотношением

$$P(x, y, z, t) = a(x, y, z, t) + \rho g z. \quad (5)$$

Система уравнений (1) – (4), где $V = \{u, v, w\}$ – компоненты вектора скорости, P – гидростатическое давление, ρ – плотность, Ω – угловая скорость вращения земли, θ – угол между вектором угловой скорости и вертикалью, μ , ν – горизонтальная и вертикальная составляющая коэффициента турбулентного обмена, задана при следующих граничных условиях:

– на входе (устье рек Дон и Кубань, а также озеро Сиваш)

$$u(x, y, z, t) = u(t), \quad v(x, y, z, t) = v(t), \quad a'_n(x, y, z, t) = 0, \quad V'_n(x, y, z, t) = 0;$$

– боковая граница (берега и дно Азовского моря)

$$\rho_v \mu (u')_n(x, y, z, t) = -\tau_x(t), \quad \rho_v \mu (v')_n(x, y, z, t) = -\tau_y(t), \quad V'_n(x, y, z, t) = 0, \quad a'_n(x, y, z, t) = 0;$$

– верхняя граница (поверхность Азовского моря)

$$\rho \mu (u')_n(x, y, z, t) = -\tau_x(t), \quad \rho \mu (v')_n(x, y, z, t) = -\tau_y(t), \quad w(x, y, t) = \omega - \frac{a'_t}{\rho g}, \quad a'_n(x, y, t) = 0;$$

– на выходе (выход в Черное море)

$$a'_n(x, y, z, t) = 0, \quad V'_n(x, y, z, t) = 0,$$

где ω – интенсивность испарения жидкости, τ_x , τ_y – составляющие тангенциального напряжения (закон Ван-Дорна), ρ_v – плотность взвеси.

Составляющие тангенциального напряжения для свободной поверхности:

$$\tau_x = \rho_a C_p (|\vec{w}|) w_x |\vec{w}|, \quad \tau_y = \rho_a C_p (|\vec{w}|) w_y |\vec{w}|,$$

где \vec{w} – вектор скорости ветра относительно воды, ρ_a – плотность атмосферы,

$$C_p (|\vec{w}|) = \begin{cases} 0.0088, & |\vec{w}| < 6,6 \text{ м/с} \\ 0.0026, & |\vec{w}| \geq 6,6 \text{ м/с} \end{cases} \text{ – безразмерный коэффициент.}$$

Процессы смешения гидродинамических характеристик, связанные со случайными колебаниями вектора скорости, являются важным природным механизмом в термогидродинамике моря. Они в значительной степени определяют динамику трансформации тепла, солености, а также биологических веществ и экологические характеристики вод, используемые при интерпретации данных наблюдений. Данные процессы включаются в современные численные модели циркуляции морей в виде параметризации процессов, не разрешаемых на используемых пространственных сетках.

Прямое численное моделирование позволяет на основе известных значений вектора скорости строить неоднородный по глубине коэффициент вертикального турбулентного обмена.

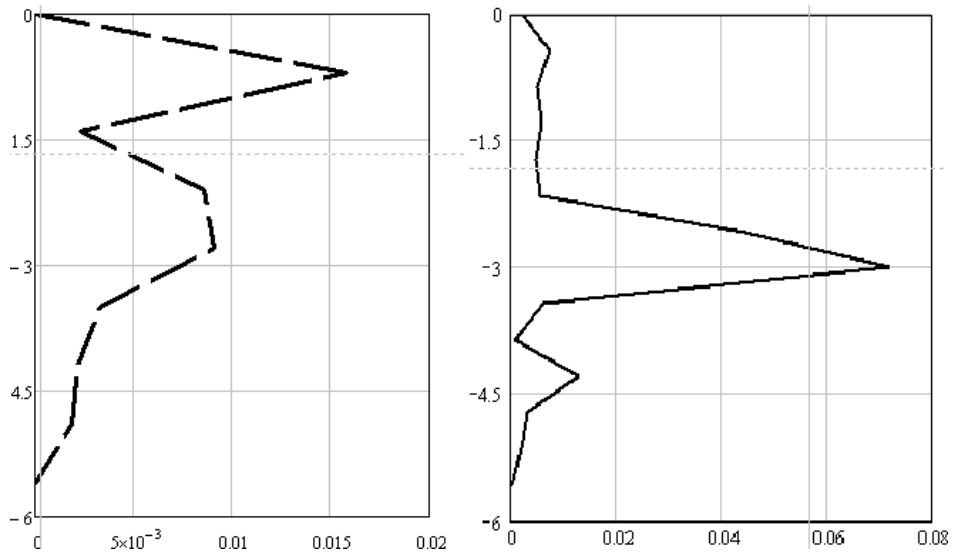


Рис. 1. Распределения коэффициента вертикального турбулентного обмена для станции 16 в Азовском море (пунктир – результат работы программы с параметризацией Белоцерковского, сплошная линия – результат экспедиционных измерений)

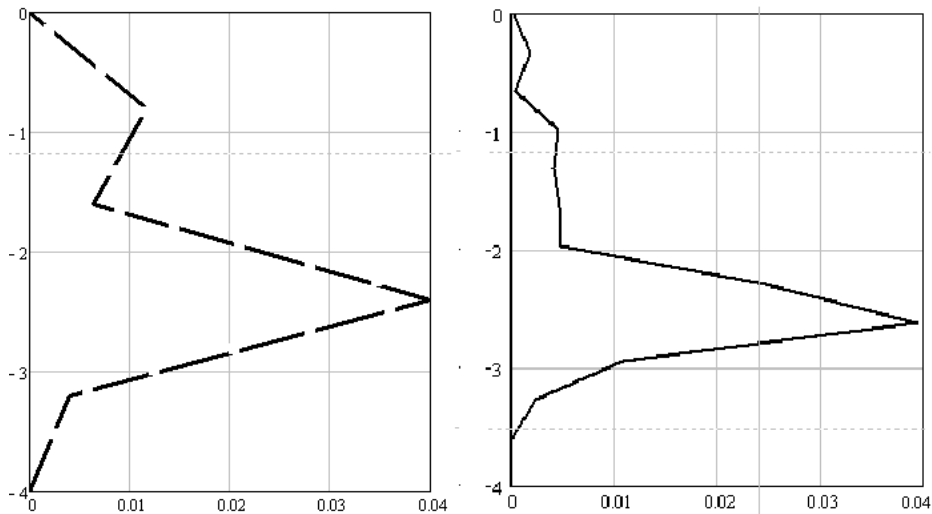


Рис. 2. Распределения коэффициента вертикального турбулентного обмена для станции 1 в Азовском море (пунктир – результат работы программы с параметризацией Белоцерковского, сплошная линия – результат экспедиционных измерений)

В современных численных моделях коэффициент вертикального турбулентного обмена часто фигурирует как подгоночный параметр, выбором которого можно добиться достаточно хорошего согласия полученных решений и данных наблюдений. Но его значение часто выбирается из соображений вычислительной устойчивости счета на длительные сроки и может на порядки превосходить физически разумные его оценки для реального моря.

Прямые методы основаны на определении турбулентных потоков как осредненных по пространству или времени (корреляции) произведений отклонений составляющих скорости течений и переносимой физической величины. Для прямых методов оценок характеристик вертикальной турбулентности существует проблема, заключающаяся в необходимости обработки больших объемов данных в длительных и дорогостоящих экспедиционных измерениях.



Рис. 3. Модуль вектора скорости на свободной поверхности

Рассмотрим параметризации расчета коэффициента вертикального турбулентного обмена, применяемых для Азовского моря.

1. Параметризация Белоцерковского

$$\nu = (C\Delta z)^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right].$$

2. Параметризация Буссинеска:

$$\nu = l_{\min}^2 0,5 \sqrt{\frac{du^2}{dz} + \frac{dv^2}{dz}}, \quad l_{\min} = 0,41z.$$

3. Параметризация Смагоринского:

$$\nu = (C\Delta)^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)}, \quad \Delta = (dxdydz)^{1/3}.$$

Был проведен численный эксперимент на основе каждого из трех подходов.

В сентябре 2005 г. проводилась экспедиция в Таганрогском заливе и северо-восточной части Азовского моря с целью получения данных для накопления информации о состоянии и изменении гидрофизических и гидрохимических параметров. Для расчета коэффициентов вертикального турбулентного обмена необходимы компоненты скорости движения жидкости, а также значения глубин точек, в которых проводились измерения. Для всех точек были рассчитаны распределения коэффициентов вертикального турбулентного обмена.

Наилучший результат работы программы, данные которого в наибольшей степени совпали с экспериментальными данными, полученными в ходе экспедиции, получен с помощью параметризации Белоцерковского.

На рис. 1, 2 изображены распределения коэффициента вертикального турбулентного для аппроксимации Белоцерковского и экспериментально полученные распределения.

Результатами работы программы являются трехмерные векторные поля, а также распределения давления в пространстве и во времени.

Далее представлено распределение модуля вектора скорости (рис. 3) и возвышение уровня водной среды (рис. 4) для Азовского моря на свободной поверхности при северном ветре 5 м/с.

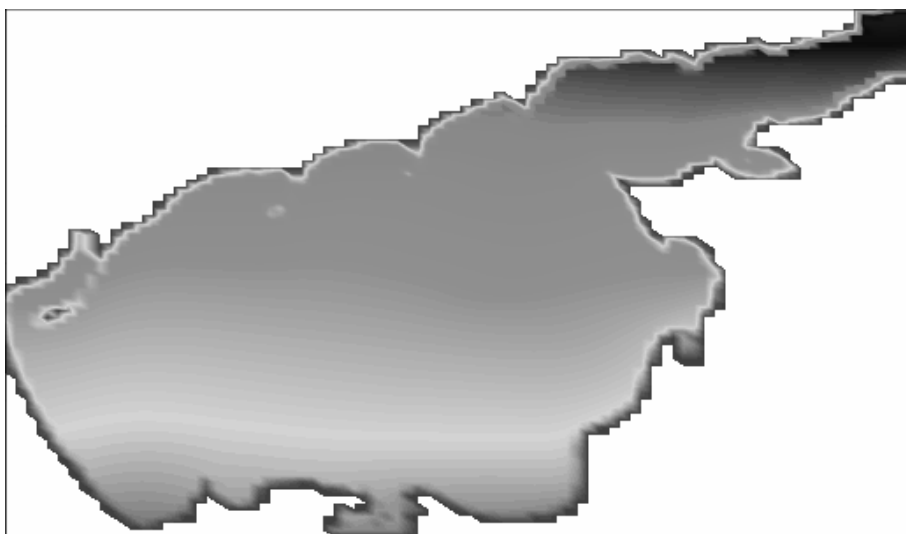


Рис. 4. Возвышение уровня водной среды

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ландау Л.Д., Лифшиц В.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 733 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989.
3. Коновалов А.Н. К теории попеременно-треугольного итерационного метода // Сибирский математический журнал. 2002. – 43:3, 552–572.
4. Монин А.С. Турбулентность и микроструктура в океане // Успехи физических наук, Т. 109. Вып. 2.
5. Белоцерковский О.М. Турбулентность: новые подходы. – М.: Наука, 2003.
6. David C. Wilcox. Turbulence Modeling for Cfd, 2002.

УДК 519.6

С.Л. Беляков, В.С. Василенко

ПОДСИСТЕМА ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ В МОБИЛЬНЫХ ГИС

В настоящее время в связи со значительным увеличением вычислительной мощности персональных цифровых устройств все большее значение приобретает их применение в мобильных геоинформационных системах (ГИС).

Современные мобильные ГИС предназначены для целей навигации, организации и проведения полевых работ с помощью карманных персональных компью-