

# Реализация параллельных алгоритмов решения модельной задачи динамики фитопланктона в мелководном водоеме с применением многопоточности в операционной системе windows

А.И. Сухинов, А.В. Никитина, И.С. Семенов

Таганрогский кампус Южного федерального университета

Работа посвящена применению функций winapi для создания параллельного алгоритма с общей памятью, реализующего задачу распространения вредоносной водоросли *Skeletonema costatum* в мелководном водоеме. Задача является актуальной, поскольку при ее решении производятся расчеты концентраций вредных веществ и вредоносных водорослей в Азовском море. Предложенный способ реализации параллельных вычислений позволяет сократить время работы программы более чем в 2 раза. За основу был взят механизм создания дополнительных потоков, который обеспечивает лучшее распределение ресурсов ЭВМ и повышает эффективность алгоритма.

## 1. Введение

В настоящее время получили широкое распространение многоядерные процессорные системы с общей памятью. Для повышения эффективности алгоритмов можно использовать библиотеку OpenMP, а также многопоточность операционной системы [1]. Под многопоточностью операционной системы будем понимать такое ее свойство, при котором вычислительный процесс, в ней порожденный, может состоять из нескольких потоков, выполняющихся параллельно, то есть без предписанного порядка во времени [2]. В данной работе разработан параллельный алгоритм с общей памятью, в котором для создания потоков используются функции winapi. Winapi – это инструмент, с помощью которого осуществлялась работа с операционной системой из прикладной программы.

## 2. Постановка задачи

За основу был взят последовательный алгоритм, с помощью которого было получено численное решение задачи динамики вредоносной водоросли *Skeletonema costatum*, имеющей наибольшее значение в питании пелагических рыб Азовского моря [3].

Рассмотрим систему из трех уравнений диффузии – конвекции – реакции в области  $G$ , представляющей собой замкнутый бассейн, ограниченный невозмущенной поверхностью водоема  $\Sigma_0$ , дном  $\Sigma_H = \Sigma_H(x, y)$  и цилиндрической поверхностью  $\sigma$ , для временного интервала  $0 < t \leq T_0$ .  $\Sigma = \Sigma_0 \cup \Sigma_H \cup \sigma$  – кусочно-гладкая граница области  $G$  [4]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{u}X) = \mu_X \Delta X + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_X \frac{\partial X}{\partial z} \right) + (\alpha_0 + \gamma M) \psi(S) X - \delta X, \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{u}S) = \mu_S \Delta S + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_S \frac{\partial S}{\partial z} \right) - (\alpha_0 + \gamma M) \psi(S) X + B(S_p - S) + f, \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{u}M) = \mu_M \Delta M + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_M \frac{\partial M}{\partial z} \right) + k_M X - \varepsilon M, \quad (3)$$

где  $X$ ,  $S$ ,  $M$  – концентрация фитопланктона (диатомовой водоросли *Skeletonema costatum*), биогенного вещества (азот, фосфор) и метаболита соответственно;  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  – вектор скорости водного потока;  $\alpha = (\alpha_0 + \gamma M)$  – коэффициент роста фитопланктона;  $\alpha_0$  – скорость

роста фитопланктона в отсутствие метаболита;  $\gamma$  – параметр воздействия;  $\mu_X, \mu_S, \mu_M, \nu_X, \nu_S, \nu_M$  – диффузионные коэффициенты в горизонтальном и вертикальном направлениях субстанций  $X, S, M$  соответственно;  $C$  – концентрация солености;  $\delta = \delta(C)$  – коэффициент убыли фитопланктона за счет отмирания (удельная смертность), учитывающий влияние солености;  $B$  – удельная скорость поступления загрязняющего вещества;  $S_p$  – предельно возможная концентрация загрязняющего вещества;  $f(x, y, z)$  – функция источника загрязнения;  $k_M$  – коэффициент экскреции;  $\varepsilon$  – коэффициент разложения метаболита;  $T$  – температура;  $\psi(T, S)$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры и концентрации биогенного вещества на рост концентрации фитопланктона.

Пусть  $n$  – вектор внешней нормали к поверхности  $\Sigma$ ,  $U_n$  – нормальная по отношению к  $\Sigma$  составляющая вектора скорости водного потока.

К системе (1) – (3) необходимо добавить начальные условия:

$$\begin{aligned} X(x, y, z, 0) &= X_0(x, y, z), \quad S(x, y, z, 0) = S_0(x, y, z), \\ M(x, y, z, 0) &= M_0(x, y, z), \quad (x, y, z) \in \bar{G}, \quad t = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

и граничные условия:

$$X = S = M = 0 \text{ на } \sigma, \text{ если } U_n < 0;$$

$$\frac{\partial X}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial n} = 0 \text{ на } \sigma, \text{ если } U_n \geq 0;$$

$$\frac{\partial X}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \text{ на } \Sigma_0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial X}{\partial z} = -\varepsilon_1 X, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = -\varepsilon_2 S, \quad \frac{\partial M}{\partial z} = -\varepsilon_3 M \text{ на } \Sigma_H,$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – неотрицательные постоянные,  $\varepsilon_1$  – учитывает опускание водорослей на дно и их затопление;  $\varepsilon_2, \varepsilon_3$  – учитывают поглощение биогенного вещества и метаболита донными отложениями.

Для модели (1) – (5) входными параметрами являются компоненты вектора скорости водной среды, которые описываются гидродинамической моделью, описанной в работах [5 – 8].

При численной реализации модели (1) – (5) использовались функции *winar* по следующим причинам:

- параллельный алгоритм не зависит от количества вычислителей на ЭВМ.
- разработка данного алгоритма является первым этапом для реализации задачи на супер-ЭВМ с общей памятью.

### 3. Описание последовательного алгоритма решения задачи

Для построения дискретной модели динамики вредоносной водоросли использовалась линеаризация по Ньютону [9, 10]:

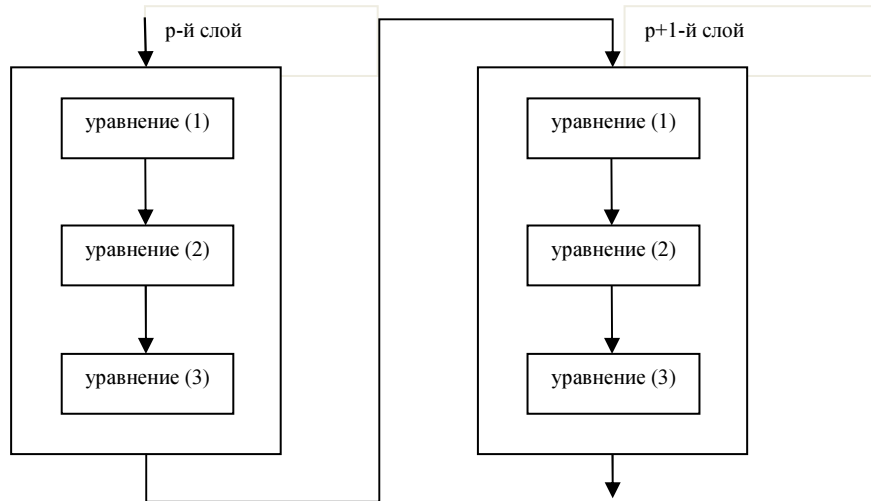
$$\begin{aligned} \hat{X}_t^{p+1} &+ \frac{(\hat{U} - |\hat{U}|)}{2} \hat{X}_x^{p+1} + \frac{(\hat{U} + |\hat{U}|)}{2} \hat{X}_{\bar{x}}^{p+1} + \frac{(\hat{V} - |\hat{V}|)}{2} \hat{X}_y^{p+1} + \frac{(\hat{V} + |\hat{V}|)}{2} \hat{X}_{\bar{y}}^{p+1} + \\ &+ \frac{(\hat{W} - |\hat{W}|)}{2} \hat{X}_z^{p+1} + \frac{(\hat{W} + |\hat{W}|)}{2} \hat{X}_{\bar{z}}^{p+1} = \mu_x (\hat{X}_{\bar{x}}^{p+1} + \hat{X}_{\bar{y}}^{p+1}) + \nu_z (\hat{X}_{\bar{z}}^{p+1})_z + \\ &+ (\alpha_0 + \gamma \hat{M}^p) \hat{S}^p \hat{X}^{p+1} - \delta \hat{X}^{p+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \hat{S}_t^{p+1} + \frac{(\hat{U} - |\hat{U}|)}{2} \hat{S}_x^{p+1} + \frac{(\hat{U} + |\hat{U}|)}{2} \hat{S}_{\bar{x}}^{p+1} + \frac{(\hat{V} - |\hat{V}|)}{2} \hat{S}_y^{p+1} + \frac{(\hat{V} + |\hat{V}|)}{2} \hat{S}_{\bar{y}}^{p+1} \\
& + \frac{(\hat{W} - |\hat{W}|)}{2} \hat{S}_z^{p+1} + \frac{(\hat{W} + |\hat{W}|)}{2} \hat{S}_{\bar{z}}^{p+1} = \mu_s (\hat{S}_{\bar{x}x}^{p+1} + \hat{S}_{\bar{y}y}^{p+1}) + \nu_s (\hat{S}_{\bar{z}}^{p+1})_z - \\
& - (\alpha_0 + \gamma \hat{M}^p) \hat{S}^{p+1} \hat{X}^p + B(S_p - \hat{S}^{p+1}) + \tilde{f},
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
& \hat{M}_t^{p+1} + \frac{(\hat{U} - |\hat{U}|)}{2} \hat{M}_x^{p+1} + \frac{(\hat{U} + |\hat{U}|)}{2} \hat{M}_{\bar{x}}^{p+1} + \frac{(\hat{V} - |\hat{V}|)}{2} \hat{M}_y^{p+1} + \frac{(\hat{V} + |\hat{V}|)}{2} \hat{M}_{\bar{y}}^{p+1} + \\
& + \frac{(\hat{W} - |\hat{W}|)}{2} \hat{M}_z^{p+1} + \frac{(\hat{W} + |\hat{W}|)}{2} \hat{M}_{\bar{z}}^{p+1} = \mu_M (\hat{M}_{\bar{x}x}^{p+1} + \hat{M}_{\bar{y}y}^{p+1}) + \nu_M (\hat{M}_{\bar{z}}^{p+1})_z + \\
& + k_M \hat{X}^{p+1} - \varepsilon \hat{M}^{p+1},
\end{aligned}$$

где  $p$  – номер итерации по нелинейности. Предложенная разностная схема обладает большим запасом устойчивости и является консервативной в случае несжимаемой водной среды [8].

Схема последовательного алгоритма расчета по (6) представлена на Рис. 1.

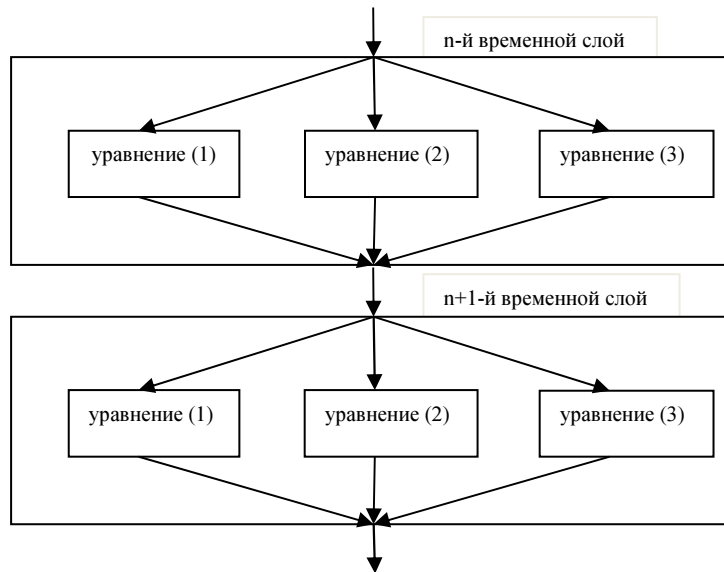


**Рис. 1.** Схема последовательного алгоритма решения задачи динамики токсичной водоросли

На каждой итерации по нелинейности производятся расчеты сначала для уравнения (1), затем для (2) и (3) соответственно как в работе [11]. Переход к следующему временному слою осуществляется в случае сходимости итерационного процесса по нелинейности. Критерием остановки итерационного процесса является:  $\|\hat{X}^{p+1} - \hat{X}^p\|_2 < \varepsilon$ , где  $\|A\|_2 = \sqrt{\sum_{i,j} |a_{ij}|^2}$ ,  $\varepsilon$  – наперед заданная точность.

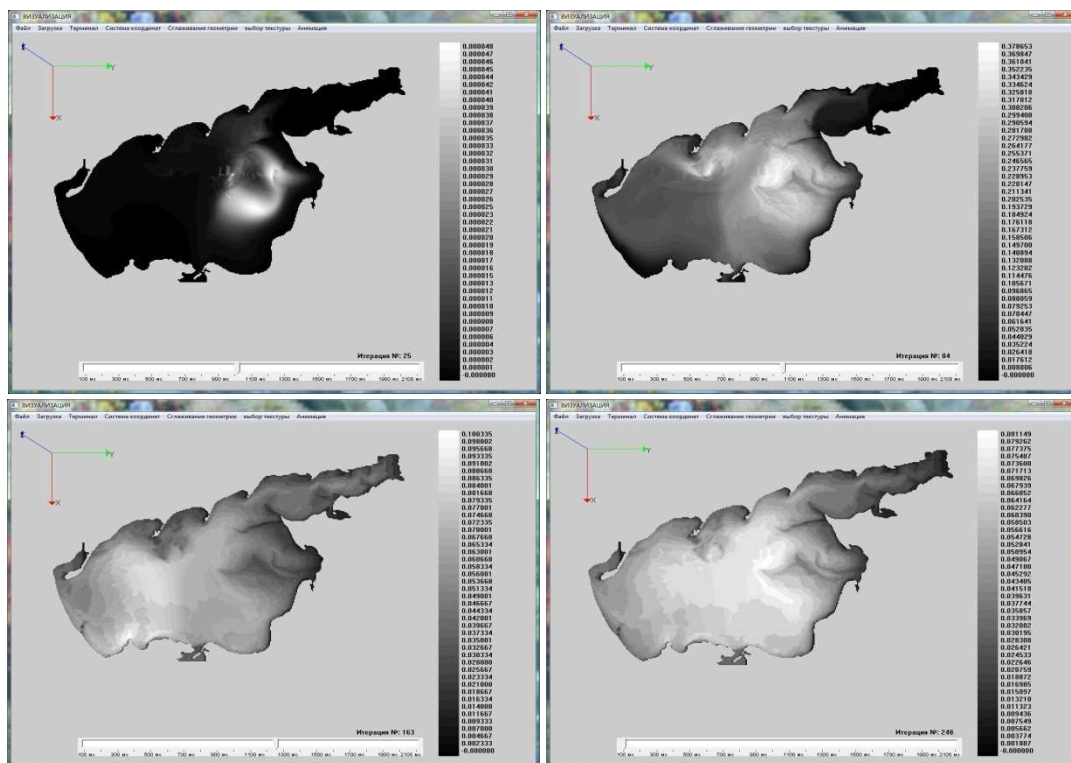
#### 4. Описание параллельного алгоритма решения задачи

Входные данные расчетов для уравнений (1) – (3) не зависят друг от друга, поэтому параллельные расчеты производились для уравнений (1) – (3) на каждом временном слое согласно схеме, представленной на **Рис. 2**.



**Рис. 2.** Схема параллельного алгоритма решения задачи динамики токсичной водоросли

В расчете по последовательной версии программы всегда присутствует один поток. Для создания дополнительных потоков в программном комплексе использовалась функция *CreateThread*.



**Рис. 3.** Распределение концентрации вредоносной водоросли в Азовском море в разные моменты времени при северном ветре

Чтобы синхронизировать созданные потоки при расчете для описанной модельной задачи гидробиологии моря на очередном временном слое использовалась функция *WaitForMultipleObjects*.

С целью оценки эффективности использования *winapi* функций фиксировалось время выполнения программы расчета для 4-х временных слоев (12-иттераций по нелинейности). Время выполнения программы без *winapi* функций составило 101 секунду, а с *winapi* функциями 69 секунд. Ускорение составило 1.46, эффективность 0.73 по сравнению с обычным последовательным алгоритмом [12]. Расчет производился на 4-ми ядерном процессоре Intel Core i7-3770K 3.5GHz.

На Рис. 3 приведены результаты работы параллельной версии программы для задачи динамики фитопланктонной популяции в мелководном водоеме (Азовское море).

Приведем физические размеры расчетной области: площадь поверхности 37605 км<sup>2</sup>, длина 343 км, ширина 231 км. Расстояние между узлами сетки по длине и ширине составляли 1 км, по глубине 1 м.

## 5. Заключение

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что применение функций *winapi* при реализации программы для решения модельной задачи динамики вредоносной водоросли в Азовском море позволяет более рационально распределить ресурсы ЭВМ и повысить эффективность алгоритма.

## Литература

1. Гергель В.П. Высокопроизводительные вычисления для многопроцессорных многоядерных систем. Москва, Изд.-во МГУ, 2010. 534 с.
2. Воеводин В.В. Вычислительная математика и структура алгоритмов. Москва, Изд.-во МГУ, 2010. 166 с.
3. Сухинов А.И., Никитина А.В., Чистяков А.Е. Моделирование сценария биологической реабилитации Азовского моря // Математическое моделирование. 2012. Т.24, №9, С. 3–21.
4. Никитина А.В. «Численное решение задачи динамики токсичных водорослей в Таганрогском заливе». // Известия ЮФУ. Технические науки.– 2010, №6(107). С 113–116.
5. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Алексеенко Е.В. Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе// Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 3. С.3–21.
6. Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Параллельная реализация трехмерной модели гидродинамики мелководных водоемов на супервычислительной системе// Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. 2012. Т.13. С. 290–297.
7. Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Адаптивный модифицированный попеременно-треугольный итерационный метод для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором// Математическое моделирование. 2012. Т.24, №1. С. 3–20.
8. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Тимофеева Е.Ф., Шишня А.В. Математическая модель расчета прибрежных волновых процессов// Математическое моделирование. 2012. Т.24, №8. С. 32–44.
9. Самарский А.А. Теория разностных схем. М. Наука, 1989. 616 с.
10. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М. Наука, 1978. 592 с.
11. Никитина А.В. Модели биологической кинетики, стабилизирующие экологическую систему таганрогского залива // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 8 (97). С. 130–134.
12. Чистяков А.Е. Теоретические оценки ускорения и эффективности параллельной реализации ПТМ скорейшего спуска// Известия ЮФУ. Технические науки. 2010, №6(107). С. 237-249.