

4. Lib Quantum. Моделирование квантовой механики / URL: <http://www.enyo.de/libquantum> (дата обращения: 27.03.2012).
5. Black P.E., Lane A.W. Modeling Quantum Information Systems // Proc. of the International Society for Optical Engineering. – 2004. – № 5436. – P. 340-347.
6. Viamontes G.F., Markov I.L., Hayes J.P. Quantum circuit simulation – Quantum Information Processing, Springer. – 2009. – 194 p.
7. Bahar R.I., Frohm E.A., Gaona C.M. Algebraic decision diagrams and their applications // ICCAD '93, Santa Clara, CA, USA, November 07-11 – Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press. – 1993. – P. 188-191.
8. Sanner S., McAllester D. Affine algebraic decision diagrams and their Application to Structured Probabilistic Inference // Proc. of IJCAI-05, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc. 2005. – 7 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Гузик Вячеслав Филиппович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: gvf@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; профессор.

Гушанский Сергей Михайлович – e-mail: kron@pbox.ttn.ru; кафедра вычислительной техники; доцент.

Евсеев Олег Константинович – e-mail: aleg.a33@rambler.ru; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Guzik Vyacheslav Filippovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: gvf@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; professor.

Gushansky Sergei Mikhailovich – e-mail: kron@pbox.ttn.ru; the department of computer engineering; associate professor.

Evseev Oleg Konstantinovich – e-mail: aleg.a33@rambler.ru; the department of computer engineering; postgraduate student.

УДК 532.5.031

А.В. Никитина, И.С. Семенов

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТОКСИЧНОЙ ВОДОРОСЛИ В АЗОВСКОМ МОРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОПОТОЧНОСТИ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ WINDOWS

*Работа посвящена применению функций `winapi` для создания параллельного алгоритма с общей памятью, реализующего задачу распространения токсичной водоросли *Skeletonema costatum* в мелководном водоеме. Задача является актуальной, поскольку при ее решении производятся расчеты концентраций вредных веществ и токсичных 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.

Математическая модель; многопоточность; функции `winapi`; токсичные водоросли; Азовское море.

A.V. Nikitina, I.S. Semenov

**PARALLEL REALIZATION OF TOXIC ALGA DYNAMIC MODEL
IN SEA OF AZOV WITH MULTITHREADING APPLICATION IN WINDOWS**

The work is devoted to construction of parallel algorithm for shared memory using winapi functions. The algorithm implements the problem of toxic algae Sceletonema costatum spread in a shallow water basin. The problem is urgent as its numerical solution gives calculations of hazardous substances and toxic algae concentration in the sea of Azov. The proposed method of parallel processing implementation allows to reduce run time more than twice. The mechanism of additional threads creating was taken as basis that ensures a better distribution of computer resources and improves the algorithm efficiency.

Mathematical model; multithreading; winapifunctions; toxic seaweed; sea of Azov.

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 процесс, в ней порожденный, может состоять из нескольких потоков, выполняющихся параллельно, т.е. 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.

Постановка задачи. За основу был взят последовательный алгоритм, с помощью которого было получено численное решение задачи динамики токсичной водоросли Sceletonemacostatum, 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 Σ_0 , дном $\Sigma_H = \Sigma_H(x, y)$ и цилиндрической поверхностью σ , для временного интервала $0 < t \leq T_0$. $\Sigma = \Sigma_0 \cup \Sigma_H \cup \sigma$ – кусочно-гладкая граница области G [6]:

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

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

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

где X, S, M – концентрация фитопланктона (диатомовой водоросли Sceletonemacostatum), биогенного вещества (азот, фосфор) и метаболита соответственно; $\bar{u} = (u, v, w)$ – вектор скорости водного потока; $\alpha = (\alpha_0 + \gamma M)$ – коэффициент роста фитопланктона; α_0 – скорость роста фитопланктона в отсутствие метаболита; γ – 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; \mathcal{E} – 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 Σ , U_n – нормальная по отношению к Σ 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:

$$\begin{aligned} X = S = M = 0, \quad \text{на } \sigma, \quad \text{если } U_n < 0; \\ \frac{\partial X}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial n} = 0, \quad \text{на } \sigma, \quad \text{если } U_n \geq 0; \\ \frac{\partial X}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial z} = 0, \quad \text{на } \Sigma_0; \\ \frac{\partial X}{\partial z} = -\varepsilon_1 X, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = -\varepsilon_2 S, \quad \frac{\partial M}{\partial z} = -\varepsilon_3 M, \quad \text{на } \Sigma_H, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – неотрицательные постоянные, ε_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 [4], [5].

Описание последовательного алгоритма решения задачи. Дискретная модель динамики токсичной водоросли имела следующий вид:

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

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

где p – номер итерации по нелинейности.

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

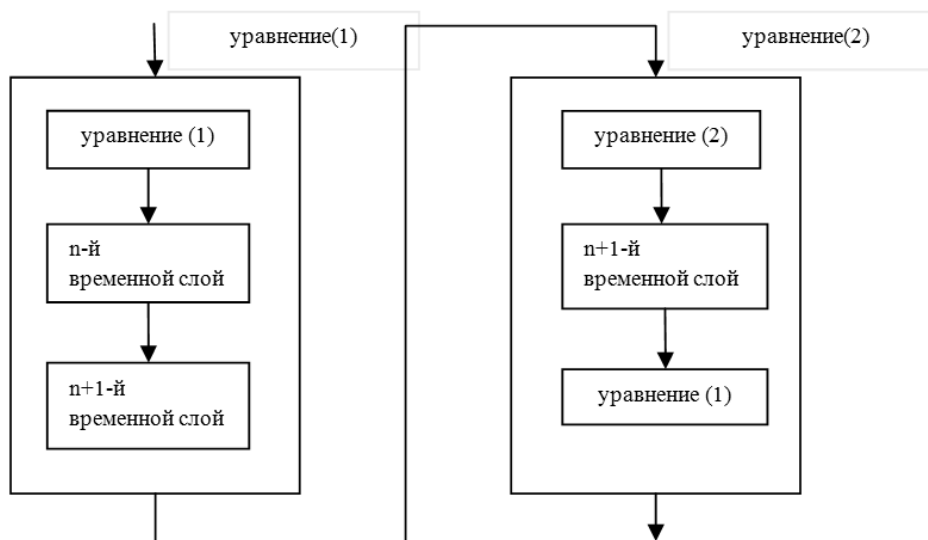


Рис. 1. Схема последовательного алгоритма решения задачи динамики токсичной водоросли

На каждом временном слое производятся расчеты сначала для уравнения (1), затем для (2) и (3) соответственно как в работе [6].

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.

В последовательной версии программы всегда присутствует один поток. Для создания дополнительных потоков в программе использовалась функция *CreateThread*. Чтобы синхронизировать созданные потоки при расчете очередного временного слоя, использовалась функция *WaitForMultipleObjects*. С целью оценки эффективности использования *winapi*-функций фиксировалось время выполнения программы расчета для 4-х временных слоев. Время выполнения программы без *winapi*-функций составило 101 секунду, а с *winapi*-функциями 69 с. Ускорение составило 1,46, эффективность составила 0,73 по сравнению с обычным последовательным алгоритмом [7].

На рис. 3 приведены результаты работы параллельной версии программы для задачи динамики фитопланктонной популяции в мелководном водоеме (Азовское море) [8].

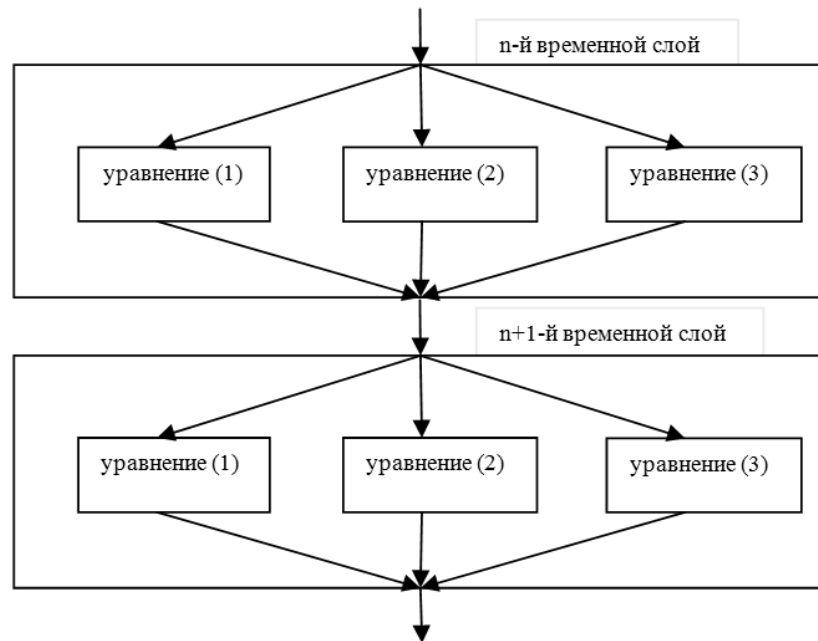


Рис. 2. Схема параллельного алгоритма решения задачи динамики токсичной водоросли

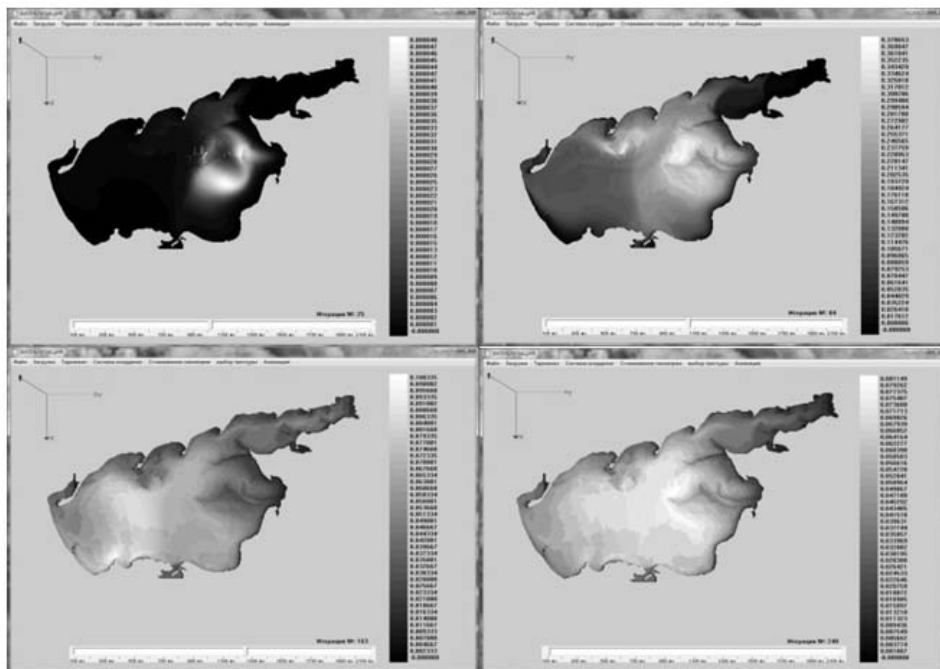


Рис. 3. Распределение концентрации токсичной водоросли в Азовском море в разные моменты времени

Приведем физические размеры расчетной области: площадь поверхности 37 605 км², длина 343 км, ширина 231 км. Расстояние между узлами сетки по длине и ширине составляли 1 км, по глубине 1 м [9].

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воеводин В.В.* Вычислительная математика и структура алгоритмов. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – 166 с.
2. *Гергель В.П.* Высокопроизводительные вычисления для многопроцессорных многоядерных систем. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – 534 с.
3. *Никитина А.В., Третьякова М.В.* Моделирование процесса альголизации мелководного водоема путем вселения в него штамма зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* bin // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 128-133.
4. *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.
5. *Sukhinov A.I., Sukhinov A.A.* Reconstruction Of 2001 Ecological Disaster in the Azov Sea on the Basis of Precise Hydrophysics Models. Parallel Computational Fluid Dynamics, Multidisciplinary Applications, Proceedings of Parallel CFD 2004 Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, ELSEVIER, Amsterdam-Berlin-London-New York-Tokyo, 2005. – P. 231-238.
6. *Никитина А.В.* Численное решение задачи динамики токсичных водорослей в Таганрогском заливе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С. 113-116.
7. *Чистяков А.Е.* Теоретические оценки ускорения и эффективности параллельной реализации ПТМ скорейшего спуска // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С. 237-249.
8. *Никитина А.В.* Модели биологической кинетики, стабилизирующие экологическую систему Таганрогского залива // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 8 (97). – С. 130-134.
9. *Сухинов А.И., Никитина А.В.* Математическое моделирование и экспедиционные исследования качества вод в Азовском море // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 8 (121). – С. 62-73.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Никитина Алла Валерьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: nikitina.vm@gmail.com; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 38, кв. 3; тел.: 89515168538; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент;

Семенов Илья Сергеевич – e-mail: flanker555@yandex.ru; г. Таганрог, ул. Комарова, 7, кв. 96; тел.: 89085029807; кафедра высшей математики; магистрант.

Nikitina Alla Valer'evna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: nikitina.vm@gmail.com; 38, Chekhov street, Apt. 3, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79515168538; the department of higher mathematics; head of department; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Semenov Ilya Sergeevich – e-mail: flanker555@yandex.ru; 7, Komarova street, Apt. 96, 347922, Russia; phone: +79085029807; the department of higher mathematics; graduate student.