Суперкомпьютерные дни в России

2021

Modeling the process of mixing water in the estuarine area in the presence of a density gradient of the aquatic environment using hybrid MPI/OpenMP technology



Alexander Sukhinov, Asya Atayan, Inna Kuznetsova, Vasilii Dolgov, **Alexander Chistyakov** and Alla Nikitina



Актуальность



Научную И практическую значимость исследований определяют проблемы мелководных водоемов прогноз путей, а заиления судоходных также предсказательное моделирование последствий природных И техногенных катастроф.

Катастрофический шторм в Керченском проливе в ноябре 2007 г. привел к крушению более чем 20 судов. Разливы нефти привели к загрязнению береговой линии и донных отложений нефтепродуктами и другими вредными веществами. Соединения нефтепродуктов в виде битумов и смол были обнаружены на побережье Черного и Азовского морей, протяженностью более 200 км в 2008-2011 г. как одно из последствий этой катастрофы.

24-25 сентября 2014 года произошло затопление прибрежных районов Азовского моря вследствие штормового нагона, уровень воды в районе порта г. Таганрога поднялся более чем на 4 метра, что нанесло значительный урон экономике региона.

25 ноября 2019 года произошло редкое природное явление – отлив у побережья Азовского моря в Краснодарском крае, которое произошло впервые за несколько десятилетий из-за сильного ветра. В портах Таганрога и Азова наблюдалась сложная ситуация – крупные суда могли сесть на мель.



3D модель гидродинамики мелководных водоемов

Исходными уравнениями гидродинамики являются:

- уравнение движения (Навье-Стокса):

$$u'_{t} + uu'_{x} + vu'_{y} + wu'_{z} = -\frac{1}{\rho}P'_{z} + (\mu u'_{x})'_{x} + (\mu u'_{y})'_{y} + (vu'_{z})'_{z} + 2\Omega(v\sin\theta - w\cos\theta),$$

$$v'_{t} + uv'_{x} + vv'_{y} + wv'_{z} = -\frac{1}{\rho}P'_{y} + (\mu v'_{x})'_{x} + (\mu v'_{y})'_{y} + (vv'_{z})'_{z} - 2\Omega u\sin\theta,$$

$$w'_{t} + uw'_{x} + vw'_{y} + ww'_{z} = -\frac{1}{\rho}P'_{z} + (\mu w'_{x})'_{x} + (\mu w'_{y})'_{y} + (vw'_{z})'_{z} + 2\Omega u\cos\theta + g.$$

– регуляризированное по Б.Н. Четверушкину*:

$$\rho'_{t} + \tau^{*} \rho''_{tt} + (\rho u)'_{x} + (\rho v)'_{y} + (\rho w)'_{z} = 0.$$

Система уравнений рассматривается при следующих граничных условиях:

- на входе (Устье рек Дон и Кубань, а также озеро Сиваш): $\mathbf{V} = \mathbf{V}_0, P'_n = 0,$
- боковая граница (берега и дно Азовского моря): $\rho \mu (\mathbf{V}_{\tau})'_{\mathbf{n}} = -\tau, \mathbf{V}_{\mathbf{n}} = 0, P'_{\mathbf{n}} = 0,$
- верхняя граница (поверхность Азовского моря): $\rho \mu (\mathbf{V}_{\tau})'_{\mathbf{n}} = -\tau, \ w = -\omega P'_t / \rho \, g, \ P'_{\mathbf{n}} = 0,$
- на выходе (выход в Черное море): $V'_{n} = 0, P'_{n} = 0.$

^{*}Четверушкин Б.Н. Пределы детализации и формулировка моделей уравнения сплошных сред // Матем. моделирование. 2012. Т. 24. № 11. С. 33



Дискретная модель гидродинамики

Равномерная прямоугольная сетка:

$$w_{h} = \left\{ x_{i} = ih_{x}, y_{i} = jh_{y}, z_{i} = kh_{z}; i = \overline{1, N_{x}}, j = \overline{1, N_{y}}, k = \overline{1, N_{z}}; N_{x}h_{x} = l_{x}, N_{y}h_{y} = l_{y}, N_{z}h_{z} = l_{z} \right\}$$

Метод поправки к давлению.

Первая задача представлена уравнением диффузии-конвекции. Вычисляется поле скорости на промежуточном временном шаге:

$$\frac{i\theta - u}{\tau} + u\overline{u}_{0} + v\overline{u}_{0} + w\overline{u}_{0} = (\mu\overline{u}_{\overline{x}})_{x} + (\mu\overline{u}_{\overline{y}})_{y} + (v\overline{u}_{\overline{z}})_{z} + 2\Omega(v\sin\theta - w\cos\theta),$$

$$\frac{i\theta - v}{\tau} + u\overline{v}_{0} + v\overline{v}_{0} + w\overline{v}_{0} = (\mu\overline{v}_{\overline{x}})_{x} + (\mu\overline{v}_{\overline{y}})_{y} + (v\overline{v}_{\overline{z}})_{z} - 2\Omega u\sin\theta,$$

$$\frac{i\theta - w}{\tau} + u\overline{w}_{0} + v\overline{w}_{0} + w\overline{w}_{0} = (\mu\overline{w}_{\overline{x}})_{x} + (\mu\overline{w}_{\overline{y}})_{y} + (v\overline{w}_{\overline{z}})_{z} + 2\Omega u\cos\theta + g.$$

Наиболее трудоемкой (второй) задачей является расчет давления:

$$\frac{1}{c^{2}}P_{u}'' - P_{xx}'' - P_{yy}'' - P_{zz}'' = -\frac{\rho - \rho}{\tau^{2}} - \frac{(\rho i\theta)_{x}}{\tau} - \frac{(\rho i\theta)_{y}'}{\tau} - \frac{(\rho i\theta)_{z}'}{\tau}.$$

В третьей задаче определяется поле скоростей на следующем шаге по времени

$$\frac{u}{\tau} - \frac{i\theta}{\rho}P_{x}', \quad \frac{v}{\tau} - \frac{i\theta}{\rho}P_{y}', \quad \frac{w - i\theta}{\tau} = -\frac{1}{\rho}P_{z}'.$$

Начальное приближение поля давления считается по гидростатическому закону. Функция заполненности ячеек водной средой вычисляется на основе:

$$o_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} + P_{i-1,j,k} + P_{i,j-1,k} + P_{i-1,j-1,k}}{4\rho g h_z}.$$



3D модель переноса взвеси

Непрерывная математическая модель транспорта взвешенных частиц

Для описания транспорта взвешенных частиц использовано уравнение диффузии-конвекции-реакции, которое может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (\omega - \omega_s) \frac{\partial C}{\partial z} = D_h \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) + D_h \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F,$$

где *C* – концентрация осадка [г/л или кг/ м³]; *V*={*u*,*v*,*w*} – составляющие поля вектора скорости [м/с]; ω_s – гидравлическая крупность или скорость осаждения взвеси в вертикальном направлении [м/с]; *H* – глубина [м]; *D_h*, *D_v* – горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии [м²/с]; *x*, *y* – координаты в горизонтальном направлении; *z* – координата в вертикальном направлении; *t* – временная переменная [с]; *F* – функция, описывающая интенсивность распределения источников загрязняющих веществ. На свободной поверхности поток в вертикальном направлении равен нулю, таким образом:

$$\left(\frac{a-b}{H}\right)D_v\frac{\partial C}{\partial z} + w_sC_k = 0.$$
 Вблизи поверхности дна Γ_b : $D_v\frac{\partial C}{\partial z} = E - D + w_sC_k,$

где *E* – поток эрозии [кг/ м²c]; *D* – интенсивность осаждения осадка [кг/ м²c]; *C*_k – массовая концентрация взвеси [кг /м³]; *n* – единичный вектор нормали к открытой границе *Г*_{ореп},

$$D = \begin{cases} 0, & \tau_b > \tau_{kr}, \\ w_s C_k \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{kr}}\right), & \tau_b \le \tau_{kr}; \end{cases} \qquad E = \begin{cases} 0, & \tau_e < \tau_{krE}, \\ M \left(\frac{\tau_e}{\tau_{krE}} - 1\right), & \tau_e \ge \tau_{krE}; \end{cases}$$

где *т* – касательное напряжение сдвига у дна [H/м²]; *т*_{kr} – критическое касательное напряжение у дна, которое оценивается на основе лабораторных испытаний, как величина, со значениями от 0,05 до 0,15 [H/ м²].



Аппроксимация операторов диффузионного и конвективного переноса:

$$(q_{0})_{i,j} uc'_{x}; (q_{1})_{i,j} u_{i+1/2,j} \frac{c_{i+1,j} - c_{i,j}}{2h_{x}} + (q_{2})_{i,j} u_{i-1/2,j} \frac{c_{i,j} - c_{i-1,j}}{2h_{x}}$$

$$(q_{0})_{i,j} (\mu c'_{x})'_{x}; (q_{1})_{i,j} \mu_{i+1/2,j} \frac{c_{i+1,j} - c_{i,j}}{h_{x}^{2}} - (q_{2})_{i,j} \mu_{i-1/2,j} \frac{c_{i,j} - c_{i-1,j}}{h_{x}^{2}} - |(q_{1})_{i,j} - (q_{2})_{i,j}| \mu_{i,j} \frac{\alpha_{x} c_{i,j} + \beta_{x}}{h_{x}}$$
B случае граничного условия третьего рода
 $u'_{n}(x, y, t) = \alpha u + \beta$.
Коэффициенты заполненности контрольных
областей $q_{m}, m = \overline{0...4}$ можно вычислить
по формулам:
 $(q_{n}) = \frac{S_{\Omega_{m}}}{S_{\Omega_{m}}}, (q_{n}) = \frac{o_{i,j} + o_{i+1,j} + o_{i+1,j+1} + o_{i,j+1}}{Q_{n}}, \qquad (i-1,j)$

$$(q_{m})_{i,j} = \frac{1}{S_{D_{m}}}, (q_{0})_{i,j} = \frac{1}{4}$$

$$(q_{1})_{i,j} = \frac{0_{i+1,j} + 0_{i+1,j+1}}{2}, (q_{2})_{i,j} = \frac{0_{i,j} + 0_{i,j+1}}{2},$$

$$(q_{3})_{i,j} = \frac{0_{i+1,j+1} + 0_{i,j+1}}{2}, (q_{4})_{i,j} = \frac{0_{i,j} + 0_{i+1,j}}{2}.$$

*о*_{*i*, *j*} - заполненность ячейки



Расположение узлов относительно ячеек (*i*, *j*)



Метод учета заполненности



Численное решение задачи:

a), c) – с использованием метода учета заполненности ячеек;

- b), d) без учета заполненности ячеек;
- a), b) размеры расчетной сетки 21×41 узлов
- c), d) размеры расчетной сетки 41×81 узлов



Зависимости погрешности решения задачи течения жидкости между двумя цилиндрами от радиуса на сетке размерами: a) 21×41 узлов, b) 41×81 узлов

	Размеры сетки	11×21	21×41	41×81	81×161	
543	Максимальное значение					
	погрешности в случае гладкой	0.053	0.052	0.058	0.056	
21	границы, м/с					
	Среднее значение погрешности в					
	случае гладкой границы, м/с	0.023	0.012	0.006	0.003	
-	Максимальное значение					
	погрешности в случае	0.272	0.731	0.717	0.75	
	ступенчатой границы, м/с					
	Среднее значение погрешности в		0.132	0.069		
	случае ступенчатой границы, м/с	0.165			0.056	



Модифицированный попеременно-треугольный итерационный метод для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором

Для решения сеточных уравнений используется неявный итерационный процесс:

$$B \frac{x^{m+1} - x^m}{\tau^m} + Ax^m = f, \quad B: H \to H.$$

Здесь А – линейный, положительно определенный оператор, m – номер итерации, τ >0 – итерационный параметр, В – некоторый обратимый оператор. При построении В будем исходить из аддитивного представления оператора – симметричной части оператора А:

$$A_0 = (A + A^*) / 2 = R_1 + R_2, \quad R_1 = R_2^*, \quad A_1 = (A - A^*) / 2.$$

Оператор-предобуславливатель задается следующим образом:

$$B = (D + \omega R_1) D^{-1} (D + \omega R_2), D = D^* > 0, \omega > 0, y \in H,$$

где D – диагональный оператор.

Значение
$$\omega$$
 минимально при
поправки. $\omega = \sqrt{\frac{\left(Dw^m, w^m\right)}{\left(D^{-1}R_2w^m, R_2w^m\right)}}, \qquad w^m -$ где вектор

Итерационные параметры для МПТМ минимальных поправок вычисляются по формуле: $\tau_{m+1} = \frac{\left(Aw^{m}, w^{m}\right)}{\left(B^{-1}Aw^{m}, Aw^{m}\right)}, \quad Bw^{m} = Ax^{m} - f \quad m = 0, 1, \dots$



Модифицированный попеременно-треугольный итерационный метод для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором

Существенным элементом при таком подходе является дополнительная априорная информация об исходной задаче. Для МПТМ эту информацию связывают с оценками δ и Δ

$$D \leq \frac{1}{\delta} A_0, \quad R_1 D^{-1} R_2 \leq \frac{\Delta}{4} A_0$$

Оценка числа обусловленности

 $Cond(C) \equiv v \leq \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{\Delta}{\delta}} \right) = \frac{1 + \sqrt{\xi}}{2\sqrt{\xi}}, \ \xi = \frac{\delta}{\Delta}$

Оценка скорости сходимости алгоритма

$$\left\|z^{n+1}\right\| \leq \frac{v^*-1}{v^*+1} \left\|z^n\right\|, \ v^* = v\left(\sqrt{k+1} + \sqrt{k}\right)^2,$$

где ν – число обусловленности матрицы $C_0 = B^{-1/2} A_0 B^{-1/2}$ при $k = \frac{\left(B^{-1} A_1 w^m, A_1 w^m\right)}{\left(B^{-1} A_0 w^m, A_0 w^m\right)}$.

Для монотонных схем: Pe<2 (Pe – сеточное число Пекле) имеет место ограничение k<1. Получим оценку параметра

$$v^* < v \left(3 + 2\sqrt{2}\right).$$



Параллельные вычислительные системы

Многопроцессорная вычислительная система

Кластер НТУ «Сириус», объемом используемой мощности 24 вычислительных узла (по 2 процессора, 12 ядер каждый) семейства Intel(R) – Xeon(R) Gold 5118 CPU 2.30GHz, тип накопителя каждого компьютера SSD объемом 3.84TB.



Вычислительный ускоритель NVIDIA Tesla K80,

обладающий высокой вычислительной производительностью и поддерживающий все современные как закрытые (CUDA), так и открытые технологии (OpenCL, DirectCompute).

Платформа NVIDIA CUDA®:



ОС – Windows 10 (x64) CUDA Toolkit – v10.0.130 Процессор – Intel Core i5-6600 3,3 ГГц ОЗУ – DDR4 32 Гб Видеоадаптер NVIDIA GeForce GTX 750 Ti 2Гб 640 ядер CUDA

<u>NVIDIA Tesla K80. Технические характеристики:</u> Частота графического процессора – 560 МГц Тип и объем видеопамяти – GDDR5 24 Гб Частота видеопамяти – 5000 МГц Разрядность шины видеопамяти 768 бит







Параллельный вариант метода решения сеточных уравнений



Результаты использования метода декомпозиции области по двум пространственным направлениям для расчета сеточных уравнений при помощи адаптивного МПТМ

n	p ₁	p ₂	MPI		MPI / OpenMP		
P			Время, с	Ускорение	Время, с	Ускорение	
1	1	1	38,16	1,00	4,78487	7,98	
2	2	1	19,6903	1,94	2,11663	18,03	
3	3	1	13,5332	2,82	1,38468	27,56	
Λ	2	2	10,001	3,82	1,34331	28,41	
4	4	1	10,2104	3,74	1,06213	35,93	
8	4	2	5,2185	7,31	0,709067	53,82	
0	8	1	5,36947	7,11	0,674545	56,57	
	4	4	2,98691	12,78	0,696349	54,80	
16	8	2	3,00383	12,70	0,582296	65,53	
	16	1	3,16188	12,07	0,574304	66,45	
	5	4	2,499	15,27	0,690245	55,28	
20	10	2	2,5475	14,98	0,650041	58,70	
	20	1	2,68232	14,23	0,643656	59,29	
	6	4	2,24099	17,03	0,637363	59,87	
04	8	3	2,24239	17,02	0,613483	62,20	
24	12	2	2,24567	16,99	0,610038	62,55	
	24	1	2,50914	15,21	0,589613	64,72	



Параллельный вариант метода решения сеточных уравнений



Зависимость ускорения параллельных алгоритмов на основе технологий MPI и MPI/OpenMP от числа вычислителей (попеременно-треугольный метод) На рисунке представлены графики ускорения разработанных параллельных алгоритмов на основе MPI и гибридной технологии MPI/OpenMP в зависимости от числа задействованных вычислителей (с учетом различных вариантов декомпозиции расчетной области). Максимальное число использованных вычислителей – 24, размер расчетной сетки составил 1000×1000×60 узлов.



Движения вод в устьевом районе при наличии существенного градиента плотности водной среды



Плотность водной среды рассчитывается

 $\rho = (1 - V) \rho_0 + V \rho_v, c = V \rho_v,$ где V – объемная доля взвеси; ρ_0 – плотность пресной воды при нормальных условиях; ρ_v – плотность взвеси.

Представлен процесс смешения вод движения вод в устьевом районе при наличии существенного градиента плотности водной среды (сечения на уровне нулевой отметке и в разрезе вдоль оси Оz) через 30 сек, 1 мин, 2 мин и 5 мин после начала расчетов.



Движения вод в устьевом районе при наличии существенного градиента плотности водной среды



Исходными данными для моделирования являются: глубина 2 м; интенсивность источника 6.27 кг/с; скорость течения 0.2 м/с; скорость осаждения 2.042 мм/с; плотность пресной воды при нормальных условиях 1000 кг/м³; плотность взвеси 2700 кг/м³.

 Параметры расчетной области:
 длина 100 м; ширина 100 м;
 шаги по горизонтальной и вертикальной
 пространственным ординатам:
 0.5 и 0.1 м соответственно;
 расчетный интервал составил 5 минут, шаг по времени 0,25



Заключение

•Рассмотрена и исследована модель гидрофизики устьевого района, учитывающая движение водной среды; переменную плотность, зависящую от солености; сложную геометрию расчетной области при наличии существенного градиента плотности водной среды.

•Численная реализация предложенных математических моделей осуществлена на основе параллельных алгоритмов, ориентированных на многопроцессорную вычислительную систему, с использованием гибридной технологии MPI / OpenMP.

•Для повышения эффективности параллельных расчетов выполнена декомпозиция расчетной области по двум пространственным направлениям.

• Приведено сравнение времени работы и ускорения работы параллельных программ на основе алгоритмов с использованием гибридной технологии MPI / OpenMP и алгоритмов, использующих технология MPI.

•Показано существенное повышение эффективности при использовании параллельных алгоритмов на основе гибридной технологии.

•Разработанный программный комплекс применен для решения модельной задачи движения вод в устьевом районе при наличии существенного градиента плотности водной среды за счет присутствия взвеси в воде.



Литература

- 1. Matishov, G.G., Il'ichev, V.G.: Optimal utilization of water resources: the concept of internal prices. Doklady Earth Sciences, vol. 406(1), pp. 86-88 (2006)
- 2. Berland, M.E.: Prediction and regulation of air pollution. Hydrometeoizdat, Leningrad (1985)
- 3. Lo, E.Y.M., Shao, S.: Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method. Applied Ocean Research, vol. 24(5), pp. 275-286 (2002) <u>https://doi.org/10.1016/S0141-1187(03)00002-6</u>
- Hejazi, K., Ghavami, A., Aslani, A.: Numerical modeling of breaking solitary wave run up in surf zone using incompressible smoothed particle hydrodinamics (ISPH). Coastal Engineering Proceedings, vol. 35, 31 (2017) <u>https://doi.org/10.9753/icce.v35.waves.31</u>
- 5. Logofet, D.O., Lesnaya, E.V.: The mathematics of Markov models: what Markov chains can really predict in forest successions. Ecological Modelling, vol. 126, pp. 285-298 (2000)
- 6. Samarskiy, A.A., Nikolaev, E.S.: Methods for solving grid equations. Nauka, Moscow (1978)
- Goloviznin, V.M., Chetverushkin, B.N.: New generation algorithms for computational fluid dynamics. Computational Mathematics and Mathematical Physics, vol. 58(8), pp. 1217-1225 (2018) <u>https://doi.org/10.1134/S0965542518080079</u>
- 8. Konovalov, A.: The steepest descent method with an adaptive alternating-triangular preconditioner. Differential Equations, vol. 40, pp. 1018-1028 (2004)
- 9. Chetverushkin, B.N., Yakobovskiy, M.V.: Numerical algorithms and architecture of HPC systems. Keldysh Institute Preprints, vol. 52, 12 p. (2018) <u>https://doi.org/10.20948/prepr-2018-52</u>
- 10.Milyukova, O.Y., Tishkin, V.F.: A multigrid method for a heat equation with discontinuous coefficients with a special choice of grids. Mathematical Models and Computer Simulation, vol. 8(2) pp. 118-128 (2016) https://doi.org/10.1134/S2070048216020101
- 11.Voevodin, V.V.: The solution of large problems in distributed computational media. Automation and Remote Control, vol. 68(5), pp. 773-786 (2007) <u>https://doi.org/10.1134/S0005117907050050</u>



Литература

- 12.Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Shishenya, A.V., Timofeeva, E.F.: Predictive Modeling of Coastal Hydrophysical Processes in Multiple-Processor Systems Based on Explicit Schemes. Mathematical Models and Computer Simulations, vol. 10(5), pp. 648-658 (2018) https://doi.org/10.1134/S2070048218050125
- 13.Gergel, V., Kozinov, E., Linev, A., Shtanyk, A.: Educational and Research Systems for Evaluating the Efficiency of Parallel Computations. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10049, pp. 278(290 (2016)
- 14.Sidney, A.A., Gergel, V.P.: Automatic selection of the fastest algorithm implementations. Numerical methods and programming, vol. 15(4), pp. 579-592 (2014)
- 15.Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Kuznetsova, I.Y., Protsenko, E.A.: Modelling of suspended particles motion in channel. Journal of Physics: Conference Series, vol. 1479(1), 012082 (2020)
- 16.Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Kuznetsova, I.Y., Protsenko, E.A., Belova, Y.V.: Modified Upwind Leapfrog difference scheme. Computational Mathematics and Information Technologies, vol. 1(1), pp.56-70 (2020)
- 17.Samarskii, A.A., Vabishchevich, P.N.: Numerical methods for solving convection-diffusion problems. URSS, Moscow (2009)
- 18.Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E.: An adaptive modified alternating triangular iterative method for solving difference equations with a nonselfadjoint operator. Mathematical Models and Computer Simulations, vol. 4, pp. 398-409 (2012) https://doi.org/10.1134/S2070048212040084
- 19. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Litvinov, V.N., Nikitina, A.V., Belova, Yu.V., Filina, A.A.: Computational Aspects of Mathematical Modeling of the Shallow Water Hydrobiological Processes. Numerical methods and programming, vol. 21, pp. 452-469 (2020) https://doi.org/10.26089/NumMet.v21r436
- 20.Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Filina, A.A., Nikitina, A.V., Litvinov, V.N.: Supercomputer simulation of oil spills in the Azov Sea. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, vol. 12(3), pp. 115{129 (2019) https://doi.org/10.14529/mmp190310
- 21.Samarskiy A.A. Teoriya raznostnykh skhem. M. Nauka, 1989.
- 22. Konovalov A.N. K teorii poperemenno treugol'nogo iteratsionnogo metoda // Sibirskiy matematicheskiy zhurnal, 2002, 43:3, - pp. 552-572.



Публикации за 2019-2021 (Math-Net)

- 1. А. И. Сухинов, Ю. В. Белова, А. Е. Чистяков, "Моделирование биогеохимических циклов в прибрежных системах Юга России", Матем. моделирование, 33:3 (2021), 20–38
- 2. *А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко, В. В. Сидорякина, С. В. Проценко,* "Комплекс объединенных моделей транспорта наносов и взвесей с учетом трехмерных гидродинамических процессов в прибрежной зоне", Матем. моделирование, 32:2 (2020), 3–23
- 3. А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, В. Н. Литвинов, А. В. Никитина, Ю. В. Белова, А. А. Филина, "Вычислительные аспекты математического моделирования гидробиологических процессов в мелководном водоеме", Выч. мет. программирование, 21:4 (2020), 452–469
- 4. А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко, В. В. Сидорякина, С. В. Проценко, "Параллельные алгоритмы решения задачи динамики изменения рельефа дна в прибрежных системах", Выч. мет. программирование, 21:3 (2020), 196–206
- 5. А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко, "Разностная схема для решения задач гидродинамики при больших сеточных числах Пекле", Компьютерные исследования и моделирование, 11:5 (2019), 833–848
- 6. *А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко, В. В. Сидорякина, С. В. Проценко,* "Метод учета заполненности ячеек для решения задач гидродинамики со сложной геометрией расчетной области", Матем. моделирование, 31:8 (2019), 79–100
- 7. *А. И. Сухинов, Г. А. Угольницкий, А. Б. Усов,* "Методы решения теоретико-игровых моделей согласования интересов при управлении рыболовством", Матем. моделирование, 31:7 (2019), 127–142
- 8. *А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков,* "Разностная схема КАБАРЕ с улучшенными дисперсионными свойствами", Матем. моделирование, 31:3 (2019), 83–96
- 9. А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, В. В. Сидорякина, С. В. Проценко, "Разностная схема с оптимальным весом для уравнения диффузии-конвекции", Выч. мет. программирование, 20:3 (2019), 283–292
- 10. А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко, "О разностных схемах кабаре и крест", Выч. мет. программирование, 20:2 (2019), 170–181
- 11. A. I. Sukhinov, A. E. Chistyakov, A. A. Filina, A. V. Nikitina, V. N. Litvinov, "Supercomputer simulation of oil spills in the Azov Sea", Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование, 12:3 (2019), 115–129



Публикации за 2019-2021 (Scopus)

- Sukhinov, A.I., Sukhinov, A.A., Sidoryakina, V.V. Uniqueness of solving the problem of transport and sedimentation of multicomponent suspensions in coastal systems. (2020) Journal of Physics: Conference Series, 1479 (1), DOI: 10.1088/1742-6596/1479/1/012081
- 2. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Kuznetsova, I.Y., Protsenko, E.A. Modelling of suspended particles motion in channel. (2020) Journal of Physics: Conference Series, 1479 (1), DOI: 10.1088/1742-6596/1479/1/012082
- 3. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Leontyev, A.L., Nikitina, A.V., Filina, A.A. Mathematical modeling of hydrophysical processes for water with complex bottom geometry. (2020) Journal of Physics: Conference Series, 1479 (1), DOI: 10.1088/1742-6596/1479/1/012083
- 4. Sukhinov, A.I., Ougolnitsky, G.A., Usov, A.B. Methods of Solving the Theoretic Game Models for Coordinating Interests in Regulating the Fishery Industry. (2020) Mathematical Models and Computer Simulations, 12 (2), pp. 176-184. DOI: 10.1134/S2070048220020143
- 5. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Protsenko, E.A., Sidoryakina, V.V., Protsenko, S.V. Accounting Method of Filling Cells for the Solution of Hydrodynamics Problems with a Complex Geometry of the Computational Domain. (2020) Mathematical Models and Computer Simulations, 12 (2), pp. 232-245. DOI: 10.1134/S2070048220020155
- Kovalenko, A.V., Yzdenova, A.M., Sukhinov, A.I., Chubyr, N.O., Urtenov, M.K. Simulation of galvanic dynamic mode in membrane hydrocleaning systems taking into account space charge. (2019) AIP Conference Proceedings, 2188, DOI: 10.1063/1.5138448
- 7. Urtenov, M.K., Kovalenko, A.V., Sukhinov, A.I., Chubyr, N.O., Gudza, V.A. Model and numerical experiment for calculating the theoretical current-voltage characteristic in electro-membrane systems. (2019) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 680 (1), DOI: 10.1088/1757-899X/680/1/012030
- 8. Gushchin, V.A., Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Sidoryakina, V.V. Optimal value of weight parameter in the scheme with weights for the diffusion-convection equation. (2019) AIP Conference Proceedings, 2172, DOI: 10.1063/1.5133550
- 9. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E. Cabaret Difference Scheme with Improved Dispersion Properties. (2019) Mathematical Models and Computer Simulations, 11 (6), pp. 867-876. DOI: 10.1134/S207004821906019X
- 10. Sukhinov, A.I., Protsenko, S.V. Long waves simulation in coastal systems using parallel computational technologies. (2019) CEUR Workshop Proceedings, 2500.
- 11. Sukhinov, A.I., Belova, Y.V., Filina, A.A. Parallel implementation of substance transport problems for restoration the salinity field based on schemes of high order of accuracy. (2019) CEUR Workshop Proceedings, 2500.



Публикации за 2019-2021 (Scopus)

- 12. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Protsenko, E.A. Difference scheme for solving problems of hydrodynamics for large grid Peclet numbers. (2019) Computer Research and Modeling, 11 (5), pp. 833-848. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-5-833-848
- Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Sidoryakina, V.V., Protsenko, E.A. Explicit-Implicit Schemes for Parallel Solving of the Suspension Transport Problems in Coastal Systems. (2019) Communications in Computer and Information Science, 1129 CCIS, pp. 39-50. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9_4
- Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Sidoryakina, V.V., Protsenko, E.A. Parallel Numerical Solution of the Suspension Transport Problem on the Basis of Explicit-Implicit Schemes. (2019) Communications in Computer and Information Science, 1063, pp. 256-268. DOI: 10.1007/978-3-030-28163-2_18
- Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Protsenko, S.V., Sidoryakina, V.V. Coupled 3D wave and 2D bottom deposit transportation models for the prediction of harmful phenomena in coastal zone. (2019) Trends in the Analysis and Design of Marine Structures -Proceedings of the 7th International Conference on Marine Structures, MARSTRUCT 2019, pp. 597-603. DOI: 10.1201/9780429298875-68
- Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Sidoryakina, V.V., Protsenko, E.A. Suspension and deposit transport models for bottom relief prediction. (2019) Trends in the Analysis and Design of Marine Structures - Proceedings of the 7th International Conference on Marine Structures, MARSTRUCT 2019, pp. 604-609. DOI: 10.1201/9780429298875-69
- Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Nikitina, A.V., Filina, A.A., Belova, Y.V. Application of High-Performance Computing for Modeling the Hydrobiological Processes in Shallow Water. (2019) Communications in Computer and Information Science, 1129 CCIS, pp. 166-181. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9_14
- Sukhinov, A., Chistyakov, A., Protsenko, E., Sidoryakina, V., Protsenko, S. Parallel Implementation of Coupled Wave and Bottom Deposit Transportation Models to Simulate Surface Pollution Areas. (2019) Communications in Computer and Information Science, 1129 CCIS, pp. 327-338. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9_27
- Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Filina, A.A., Nikitina, A.V., Litvinov, V.N. Supercomputer simulation of oil spills in the Azov Sea. (2019) Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, 12 (3), pp. 115-129. DOI: 10.14529/mmp190310
- 20. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Nikitina, A.V., Filina, A.A., Lyashchenko, T.V., Litvinov, V.N. The Use of Supercomputer Technologies for Predictive Modeling of Pollutant Transport in Boundary Layers of the Atmosphere and Water Bodies. (2019) Communications in Computer and Information Science, 1063, pp. 225-241. DOI: 10.1007/978-3-030-28163-2_16



Монографии, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

- Сухинов А.И., Никитина А.В., Чистяков А.Е. Разработка методов численного решения задач гидробиологии моря: монография. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. 147 с.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Казарян Д.С., Чистяков А.Е. Математическое моделирование пространственнонеоднородных гидробиологических процессов в Азовском море: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 172 с.
- Никитина А.В., Чистяков А.Е., Семенов И.С. Расчет распространения токсичной водоросли в Азовском море на вычислительной системе с использованием многопоточности в среде Windows // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012614681, РФ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.05.2012 г.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Чистяков А.Е., Царевский В.В., Фоменко Н.А. Программный комплекс решения сеточных уравнений для трехмерных задач диффузии – конвекции – реакции итерационными методами // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012614680, РФ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.05.2012 г.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Семенов И.С. Расчет для модели взаимодействующих фитопланктонных популяций в Азовском море на вычислительной системе с использованием базы экспедиционных данных // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012614678, РФ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.05.2012 г.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Семенов И.С. Расчет для модели взаимодействия планктона и промысловых рыб в мелководном водоеме на вычислительной системе с использованием библиотеки программ эффективного решения сеточных уравнений // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012614677, РФ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.05.2012 г.
- Никитина А.В., Чистяков А.Е., Хачунц Д.С., Семенякина А.А. Программа для решения сеточных уравнений итерационными методами на многопроцессорной вычислительной системе // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015616787, РФ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.06.2015 г.
- Никитина А.В., Чистяков А.Е., Хачунц Д.С., Семенякина А.А. Программа решения задачи диффузии-конвекции-реакции на основе схем повышенного порядка точности // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015617008, РФ. Зарегистровано в Реестре программ для ЭВМ 26.06.2015 г.
- Семенов И.С., Сухинов А.И., Никитина А.В., Чистяков А.Е., Хачунц Д.С. Программа для моделирования процессов биологической реабилитации мелководного водоема // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016661533, РФ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.10.2016 г.
- Сумбаев В.В., Чистяков А.Е., Никитина А.В., Семенов И.С. Программа для решения сеточных уравнений многосеточным методом // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016661550, РФ. Зарегистриро 21 Реестре программ для ЭВМ 13.10.2016 г.



Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ







Благодарю за внимание!