

# Математическое моделирование гидродинамических процессов мелководных водоёмов с учетом процессов переноса солей и тепла

А.Е. Чистяков<sup>1,2</sup>, А.В. Никитина<sup>2,3,4</sup>, Ю.В. Белова<sup>1</sup>, В.Н. Литвинов<sup>1,5</sup>, А.А. Филина<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, Гагарина 1, Ростов-на-Дону, Россия, 344000

<sup>2</sup>Научно-технологический университет “Сириус”, Олимпийский 1, Сочи, Россия, 354340

<sup>3</sup>Южный федеральный университет, Большая Садовая 105/42, Ростов-на-Дону, Россия, 344006

<sup>4</sup>ООО “НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров”, Итальянский 106, Таганрог, Россия, 347900

<sup>5</sup>Азово-Черноморский инженерный институт Донской ГАУ, Ленина 21, Зерноград, Россия, 347900

**Аннотация.** В работе приведено описание трехмерной математической модели гидродинамики, учитывающей процессы переноса солей и тепла. Для аппроксимации уравнения диффузии – конвекции – реакции по времени использованы схемы с весами. Аппроксимация задачи расчета поля скорости движения водной среды по пространственным переменным выполнена на основе метода баланса с учетом коэффициентов заполненности контрольных областей. Исследованы стационарные режимы задачи переноса тепла и солей. На основе мониторинга водной акватории построены трехмерные математические модели движения водной среды, предназначенные для прогнозирования возможных сценариев развития экосистемы Азовского моря для избегания возникновения областей анаэробного заражения и принятия своевременных мер для их локализации. Приведено описание программного комплекса, позволяющего моделировать гидродинамические процессы в мелководных водоемах со сложными пространственными структурами течений с учетом транспорта солей и тепла.

## 1. Введение

Для прогнозирования состояния мелководных водоемов строятся математические модели, учитывающие уникальные особенности исследуемого водного объекта – климатические факторы и гидродинамические режимы. Среди трудов российских ученых, посвященных исследованию и прогнозу водных экосистем можно выделить работы Марчука Г.И.[1], Матишова Г.Г.[2, 3], Сухинова А.И.[4, 5], Тютюнова Ю.В.[6], Якушева Е.В.[7], Ильичева В.Г. и др. Разработкой моделей, программных комплексов и информационных систем для мониторинга и прогнозирования состояния экосистем водных объектов занимаются ведущие зарубежные научно-исследовательские центры и организации: Sweden’s Meteorological and Hydrological Institute; Center for Water Research; National Oceanic and Atmospheric Administration; Centre for Ecology and Hydrology [8, 9].

Существующие программные комплексы, позволяющие моделировать гидродинамические процессы (SALMO, CHARISMA, «Mars3d», СHTDM, CARDINAL, PHOENICS, Экоинтегратор и др.), не учитывают пространственно-неоднородное движение водной среды, не обладают необходимой точностью для моделирования вихревых структур течений, не являются консервативными, не учитывают сложную форму рельефа дна и берега, испарение, стоки рек, соленость, температуру и другие факторы, а также проявляют неустойчивость при значительных перепадах глубин и изменении плотности водной среды [10-13].

## 2. Постановка модельной задачи

В основу разрабатываемой модели расчета трёхмерных полей вектора скорости движения водной среды, температуры и солености положена математическая модель гидродинамики мелководных водоёмов, учитывающая транспорт тепла и солей [14]:

– уравнение движения (Навье – Стокса)

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

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

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

– уравнение неразрывности в случае переменной плотности

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

– уравнение транспорта тепла

$$T'_t + uT'_x + vT'_y + wT'_z = (\mu T'_x)'_x + (\mu T'_y)'_y + (\mu T'_z)'_z + f_T, \quad (5)$$

– уравнение транспорта солей

$$S'_t + uS'_x + vS'_y + wS'_z = (\mu S'_x)'_x + (\mu S'_y)'_y + (\mu S'_z)'_z + f_S, \quad (6)$$

где  $\mathbf{V} = \{u, v, w\}$  – компоненты вектора скорости;  $P$  – полное гидродинамическое давление;  $\rho$  – плотность водной среды;  $\mu, \nu$  – горизонтальная и вертикальная составляющие коэффициента турбулентного обмена;  $\mathbf{\Omega} = \Omega \cdot (\cos\vartheta \cdot \mathbf{j} + \sin\vartheta \cdot \mathbf{k})$  – угловая скорость вращения Земли определяется выражением;  $\vartheta$  – широта места;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f_T, f_S$  – источники тепла и соли (находится на границе области).

Из полного гидродинамического давления условно выделены две составляющие: давления столба жидкости и гидродинамическая часть [15]:

$$P(x, y, z, t) = p(x, y, z, t) + \rho_0 g z, \quad (7)$$

где  $p$  – гидростатическое давление невозмущенной жидкости;  $\rho_0$  – плотность пресной воды при нормальных условиях.

Уравнение состояния для плотности

$$\rho = \tilde{\rho} + \rho_0, \quad (8)$$

где  $\rho_0$  – плотность пресной воды при нормальных условиях,  $\tilde{\rho}$  определяется уравнением, рекомендованным UNESCO

$$\begin{aligned} \tilde{\rho} = & \tilde{\rho}_w + (8.24493 \cdot 10^{-1} - 4.0899 \cdot 10^{-3}T + \\ & + 7.6438 \cdot 10^{-5}T^2 - 8.2467 \cdot 10^{-7}T^3 + 5.3875 \cdot 10^{-9}T^4)S + \\ & + (-5.72466 \cdot 10^{-3} + 1.0227 \cdot 10^{-4}T - 1.6546 \cdot 10^{-6}T^2)S^{3/2} + 4.8314 \cdot 10^{-4}S^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\tilde{\rho}_w$  – плотность пресной воды, задаваемая полиномом

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_w = & 999.842594 + 6.793952 \cdot 10^{-2}T - 9.095290 \cdot 10^{-3}T^2 + \\ & + 1.001685 \cdot 10^{-4}T^3 - 1.120083 \cdot 10^{-6}T^4 + 6.536332 \cdot 10^{-9}T^5. \end{aligned}$$

Уравнение (9) применимо для солености в диапазоне 0 – 42 ‰ и температуры от -2 до 40 °С.

Система уравнений (1) – (6) рассматривается при следующих краевых условиях:

– на входе

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0, P'_n = 0, T = T_0, S = S_0, \quad (10)$$

– донная граница

$$\rho\nu\mu(\mathbf{V}_\tau)'_n = -\tau, \mathbf{V}_n = 0, P'_n = 0, T'_n = 0, S'_n = 0, f_T = 0, f_S = 0, \quad (11)$$

– боковая граница

$$(\mathbf{V}_\tau)'_{\mathbf{n}} = 0, \mathbf{V}'_{\mathbf{n}} = 0, P'_{\mathbf{n}} = 0, T'_{\mathbf{n}} = 0, S'_{\mathbf{n}} = 0, f_T = 0, f_S = 0, \quad (12)$$

– верхняя граница

$$\rho_v \mu (\mathbf{V}_\tau)'_{\mathbf{n}} = -\boldsymbol{\tau}, w(x, y, t) = -\omega - P'_t / \rho g, P'_{\mathbf{n}} = 0, \quad (13)$$

$$T'_{\mathbf{n}} = 0, S'_{\mathbf{n}} = 0, f_T = k(T_a - T), f_S = \frac{\omega}{h_z - \omega} S,$$

– на выходе (Керченский пролив)

$$P'_{\mathbf{n}} = 0, \mathbf{V}'_{\mathbf{n}} = 0, T'_{\mathbf{n}} = 0, S'_{\mathbf{n}} = 0, f_T = 0, f_S = 0, \quad (14)$$

где  $\omega$  – интенсивность испарения жидкости;  $\mathbf{V}_\tau$  – нормальная и тангенциальная составляющая вектора скорости;  $\boldsymbol{\tau} = \{\tau_x, \tau_y, \tau_z\}$  – вектор тангенциального напряжения;  $\rho$  – плотность водной среды;  $\rho_v$  – плотность взвеси;  $T_a$  – температура атмосферы;  $k$  – коэффициент передачи тепла между атмосферой и водной средой.

Составляющие тангенциального напряжения для свободной поверхности  $\boldsymbol{\tau} = \rho_a C d_s |\mathbf{w}| \mathbf{w}$ , где  $\mathbf{w}$  – вектор скорости ветра относительно воды;  $\rho_a$  – плотность атмосферы;  $C d_s$  – безразмерный коэффициент поверхностного сопротивления, который зависит от скорости ветра, рассматривается в диапазоне 0.0016-0.0032.

Тангенциальное напряжение для дна  $\boldsymbol{\tau} = \rho C d_b |\mathbf{u}| \mathbf{u}$ , где  $C d_b = g k^2 / h^{1/3}$ , где  $k$  – групповой коэффициент шероховатости в формуле Мэннинга, рассматривается в диапазоне 0.025–0.2;  $h = H + \eta$  – глубина акватории,  $H$  – глубина до невозмущенной поверхности,  $\eta$  – высота свободной поверхности относительно геоида (уровень моря).

Система уравнений (1) – (6) рассматривается при следующих начальных условиях

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0, T = T_0, S = S_0. \quad (15)$$

### 3. Метод решения задачи гидродинамики

Согласно методу поправки к давлению, исходная модель гидродинамики разбивается на три подзадачи [16, 17]. Первая подзадача представлена уравнением диффузии – конвекции – реакции, при помощи которого вычисляются компоненты поля вектора скорости на промежуточном слое по времени:

$$\frac{\tilde{u} - u}{\tau} + u\tilde{u}'_x + v\tilde{u}'_y + w\tilde{u}'_z = (\mu\tilde{u}'_x)'_x + (\mu\tilde{u}'_y)'_y + (v\tilde{u}'_z)'_z + 2\Omega(v \sin \theta - w \cos \theta),$$

$$\frac{\tilde{v} - v}{\tau} + u\tilde{v}'_x + v\tilde{v}'_y + w\tilde{v}'_z = (\mu\tilde{v}'_x)'_x + (\mu\tilde{v}'_y)'_y + (v\tilde{v}'_z)'_z - 2\Omega u \sin \theta, \quad (16)$$

$$\frac{\tilde{w} - w}{\tau} + u\tilde{w}'_x + v\tilde{w}'_y + w\tilde{w}'_z = (\mu\tilde{w}'_x)'_x + (\mu\tilde{w}'_y)'_y + (v\tilde{w}'_z)'_z + 2\Omega u \cos \theta + g \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right).$$

Следует отметить, что слагаемое  $g(\rho_0 / \rho - 1)$  описывает плавучесть (Силу Архимеда). Многочисленными экспериментами по моделированию движения среды в мелководных водоемах подобных Азовскому морю установлено, что данное слагаемое вносит незначительный вклад в решение задачи и им можно пренебречь. Для аппроксимации уравнения диффузии – конвекции – реакции по времени использованы схемы с весами. Здесь  $\bar{u} = \sigma \tilde{u} + (1 - \sigma)u$ ,  $\sigma \in [0, 1]$  – вес схемы.

Расчет распределения давлений (вторая подзадача) базируется на уравнении Пуассона

$$p''_{xx} + p''_{yy} + p''_{zz} = \frac{\hat{\rho} - \rho}{\tau^2} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{u})'_x}{\tau} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{v})'_y}{\tau} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{w})'_z}{\tau}. \quad (17)$$

Значение поля скорости на верхней границе (поверхности водоема) задается следующим образом:  $w = -\omega - P'_t / \rho g$ . В качестве начального приближения для данной задачи использовалась упрощенная гидростатическая модель движения водной среды, что значительно уменьшает время расчета.

Третья подзадача позволяет по явным формулам определить распределение скоростей на следующем слое по времени

$$\frac{\hat{u} - \tilde{u}}{\tau} = -\frac{1}{\hat{\rho}} p'_x, \quad \frac{\hat{v} - \tilde{v}}{\tau} = -\frac{1}{\hat{\rho}} p'_y, \quad \frac{\hat{w} - \tilde{w}}{\tau} = -\frac{1}{\hat{\rho}} p'_z, \quad (18)$$

где  $\tau$  – шаг по временной координате,  $u$  – значение поля вектора скорости на предыдущем слое по времени,  $\tilde{u}$  – значение поля скорости на промежуточном слое по времени,  $\hat{u}$  – значение на текущем слое по времени.

Расчетная область вписана в параллелепипед. Для программной реализации трехмерной математической модели гидродинамики вводится равномерная сетка. Обозначим  $o_{i,j,k}$  степень «заполненность» ячейки  $(i, j, k)$ . Степень заполненности ячейки задается давлением водного столба на дно данной ячейки. В общем случае степень заполненности ячеек рассчитывается исходя из выражения [18]:

$$o_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} + P_{i-1,j,k} + P_{i,j-1,k} + P_{i-1,j-1,k}}{4\rho gh_z}. \quad (19)$$

Аппроксимация задачи расчета поля скорости движения водной среды по пространственным переменным выполнена на основе метода баланса с учетом коэффициентов заполненности контрольных областей.

#### 4. Описание программного комплекса и результаты численных экспериментов

Для получения функции солёности можно использовать решение уравнения диффузии, которое на длительные интервалы времени сводится к решению уравнения Лапласа. Однако функция солёности, полученная подобным образом, может не обладать достаточной степенью гладкости в точках задания значений поля. Поэтому используем уравнение, применяемое для получения схем повышенного порядка точности для уравнения Лапласа:

$$\Delta S - \frac{h^2}{12} \Delta^2 S = 0, \quad (20)$$

где  $S$  – солёность (температура) водоема.

При решении задачи обработки гидрологической информации получены изолинии солёности и температуры, для чего применен алгоритм распознавания. С помощью алгоритма интерполяции и путем наложения границ области получены карты солёности и температуры Азовского моря (рисунки 1, 2).

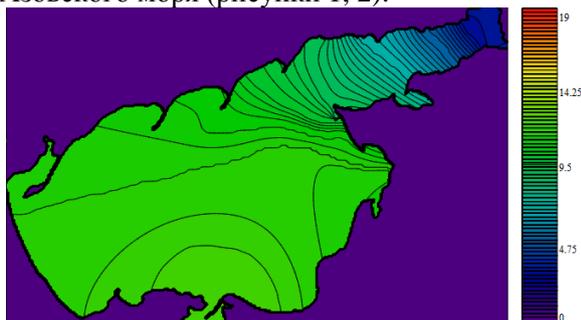


Рисунок 1. Восстановленное поле солёности Азовского моря.

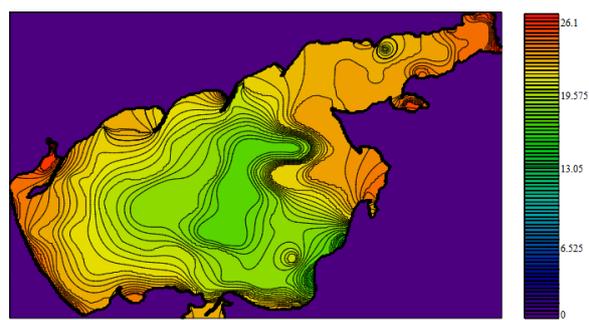
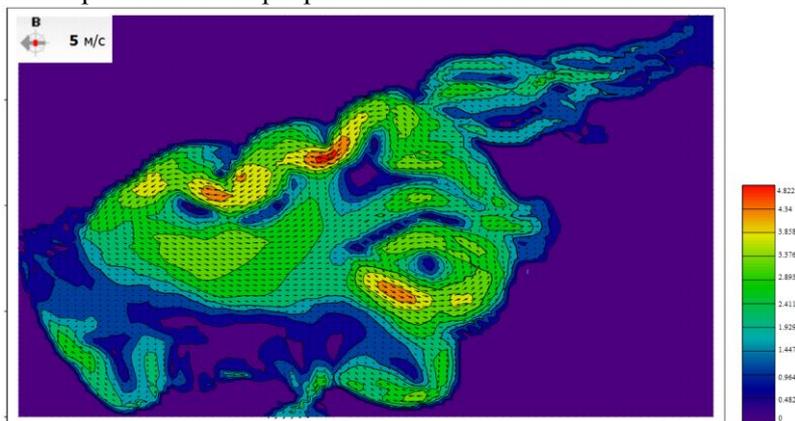


Рисунок 2. Восстановленное поле температуры Азовского моря.

В результате проведённых исследований разработан программный комплекс, позволяющий более точно описывать гидродинамические процессы, транспорт солей и тепла в мелководных водоемах, подобных Азовскому морю, со сложными пространственными структурами течений в условиях уменьшения пресноводного стока р. Дон, увеличения стока высокосолёных вод озера Сиваш и фильтрации вод солёных озёр на северо-востоке Крыма. Программная реализация математических моделей учитывает силу Кориолиса, ветровые течения и трение о дно, турбулентный обмен, испарение, стоки рек, а также сложную геометрию дна и береговой линии. Расчетная область соответствует физическим размерам Азовского моря: длина равна

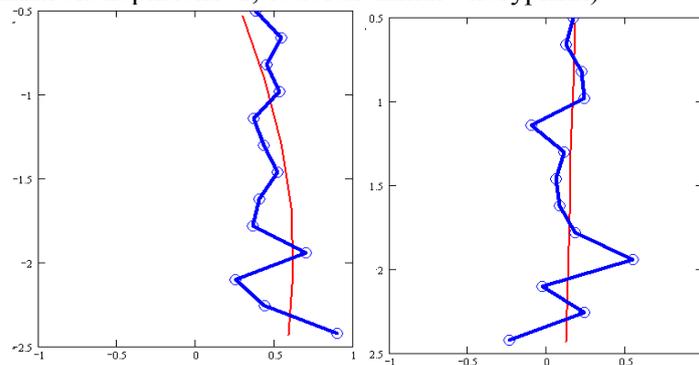
355 км, ширина равна 233 км, шаг по пространству в горизонтальном направлении 1000 м. Временной интервал - 30 суток.

Для реконструкции экологической катастрофы была построена трехмерная математическая модель, описывающая гидрофизические процессы, происходящие в мелководных водоемах. На рисунке 3 приведены результаты численного моделирования движения водной среды в акватории Азовского моря на основе программного комплекса «Azov3d».



**Рисунок 3.** Результаты математического моделирования движения водной среды (баротропные течения).

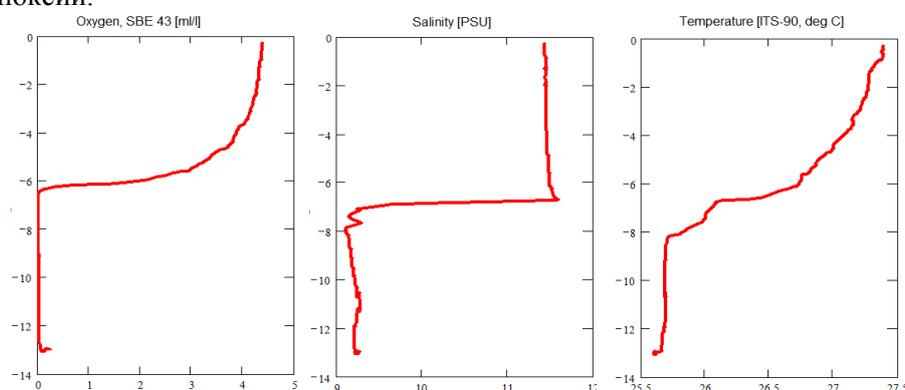
Проведены комплексные экспедиционные измерения параметров водной среды в акватории Азовского моря и Таганрогского залива для обновления баз данных многолетних наблюдений состояния водной среды. На основе мониторинга водной акватории построены трехмерные математические модели движения водной среды, предназначенные для прогнозирования возможных сценариев развития экосистемы Азовского моря, для избежания возникновения областей анаэробного заражения и принятия своевременных мер для их локализации. На рисунке 4 приведены профили горизонтальных составляющих вектора скорости (тонкая линия – результаты численных экспериментов, толстая линия - натуральных).



**Рисунок 4.** Профили горизонтальной компоненты вектора скорости (слева составляющая вектора скорости направленная с запада на восток, справа – с севера на юг).

Измерение мгновенных значений вектора скорости происходило на основе акустического профилографа «ADCP Workhorse 600 Sentinel». При помощи данного прибора можно получать вертикальный профиль трехмерного вектора скорости (128 значений с минимальным шагом 10 сантиметров по вертикальной координате). Основываясь на результатах экспедиционных измерений параметров водной среды, проведённых авторами в акватории Азовского моря, можно утверждать, что существует участок, на котором происходят заморные явления, появление которого имеет сезонный характер. На рисунке 6 представлены результаты натуральных измерений профиля температуры, солёности и растворенного кислорода, полученные при помощи гидрофизического зонда «Sea Bird Electronics 19 Plus» на одной из

экспедиционных станций. Из рисунка 5 видно, что содержание кислорода на глубине более 6,5 метров близко к нулю. На данной станции наибольшая область воды была подвергнута явлениям аноксии.



**Рисунок 5.** Слева профиль растворенного кислорода [ml/l], справа – температуры [C], в центре – соленость [PSU].

Измерения проводились по вертикали, начиная, от ближней зоны чувствительности ADCP – зонда до дна. Профилограф работает на доплеровском эффекте, передавая акустический сигнал на фиксированной частоте и принимая отраженный на неоднородностях водной среды сигнал в расположенной под излучателем (начиная с зоны чувствительности) толще водного столба. Изучено влияние изменения значений коэффициента вертикального турбулентного обмена на содержание растворенного кислорода в придонном слое мелководного водоема. Примерно на глубине 3 метров и ниже значения коэффициента вертикального турбулентного обмена близки к нулю, что означает пониженный турбулентный обмен по вертикали в данной области, объясняет явление гипоксии в придонном слое центрально-восточной части Азовского моря.

## 5. Выводы

Предложенная 3D модель гидродинамики мелководных водоемов позволяет получить трехмерные поля вектора скоростей водного потока, давления, плотности морской воды, солености, температуры. На мелководье в моделях гидродинамики большое влияние на поля течений оказывает геометрия дна водоема. При разработке моделей гидродинамики мелководных водоемов использовались результаты экспедиционных измерений. Производились замеры скоростей течения водного потока на основе зонда ADCP, измеряющего мгновенные значения вертикального профиля вектора скорости. При настройке прибора были заданы: шаг по вертикали – 10 см, количество измерений по вертикали – 128, частота измерений – 1 с. Для фильтрации натуральных данных применялся алгоритм фильтра Калмана. Из сопоставления результатов моделирования и натуральных измерений коэффициента вертикального турбулентного обмена на различных горизонтах водоема, сделан вывод о том, что результаты расчетов турбулентных процессов в мелководных водоемах на основе подсеточной модели турбулентности Смагоринского лучше всего согласуются с натурными данными.

## 6. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-51017.

## 7. Литература

- [1] Марчук, Г.И. Динамика океанских приливов / Г.И. Марчук, Б.А. Каган – Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. – 359 с.
- [2] Матишов, Г.Г. Об оптимальной эксплуатации водных ресурсов. Концепция внутренних цен / Г.Г. Матишов, В.Г. Ильичев // Докл. АН. – 2006. – Т. 406, № 2. – С. 249-251.

- [3] Матишов, Г.Г. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878-2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Черное, Азовское и Каспийское моря / Г.Г. Матишов, С.В. Бердников, А.П. Жичкин – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2014. – 256 с.
- [4] Sukhinov, A.I. Supercomputer Modeling of Hydrochemical Condition of Shallow Waters in Summer / A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, A.V. Nikitina, Y.V. Belova, V.V. Sumbaev, A.V. Semenyakina // Communications in Computer and Information Science. – 2018. – Vol. 910. – P. 336-351.
- [5] Gushchin, V.A. A Model of Transport and Transformation of Biogenic Elements in the Coastal System and Its Numerical Implementation / V.A. Gushchin, A.I. Sukhinov, A.V. Nikitina, A.E. Chistyakov, A.A. Semenyakina // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2018. – Vol. 58. – P. 1316-1333.
- [6] Tyutyunov, Yu.V. Simple models for studying complex spatiotemporal patterns of animal behaviour / Yu.V. Tyutyunov, L.I. Titova // Deep-Sea Research Part II, 2017. – P. 193-202.
- [7] Yakushev, E.V. Mathematical modeling of the influence of marine biota on the carbon dioxide ocean-atmosphere exchange in high latitudes / E.V. Yakushev, G.E. Mikhailovsky // Air-Water Gas Transfer, Sel. Papers, Third Int. Symp. – Germany: AEON Verlag Studio Hanau, 1995. – P. 37-48.
- [8] Oliger, J. Theoretical and practical aspects of some initial boundary-value problems in fluid dynamics SIAM / J. Oliger, A. Sundstorm // Journal on Applied Mathematics. – 1978. – Vol. 35. – P. 419-445.
- [9] Marchesiello, P. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models / P. Marchesiello, J.C. McWilliams, A. Shchepetkin // Oceanic Modelling Journal. – 2001. – Vol. 3. – P. 1-20.
- [10] Вольцингер, Н.Е. Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 271 с.
- [11] Андросов, А.А. Проливы мирового океана. Общий подход к моделированию / А.А. Андросов, Н.Е. Вольцингер – Санкт-Петербург: Наука, 2005. – 171 с.
- [12] Tran, J.K. A predator-prey functional response incorporating indirect interference and depletion / Verh. Internat. Verein. Limnol. – 2008. – Vol. 30. – P. 302-305.
- [13] Alekseenko, E. Coastal hydrodynamics in a windy lagoon / E. Alekseenko, B. Roux, A.I. Sukhinov, R. Kotarba, D. Fougere // Computers and Fluids. – 2013. – Vol. 77. – P. 24-35.
- [14] Nikitina, A.V. Modeling of production and destruction processes in coastal systems on a supercomputer / A.V. Nikitina, L.V. Kravchenko, I. Semenov, Y.V. Belova, A.A. Semenyakina // MATEC Web of Conference. – 2018. – Vol. 22. – P. 226.
- [15] Белоцерковский, О.М. Турбулентность. Новые подходы / О.М. Белоцерковский, А.М. Опарин, В.М. Чечеткин – М.: Наука, 2003. – 286 с.
- [16] Самарский, А.А. Численные методы решения задач конвекции-диффузии / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич – М.: URSS, 2009. – 248 с.
- [17] Коновалов, А.Н. Метод скорейшего спуска с адаптивным попеременно-треугольным переобусловливателем / Дифференциальные уравнения. – 2004. – Т. 40, № 7. – С. 953-963.
- [18] Sukhinov, A.I. Predictive modeling of coastal hydrophysical processes in multiple-processor systems based on explicit schemes / A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, A.V. Shishenya, E.F. Timofeeva // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2018. – Vol. 10(5). – P. 648-658.

# Mathematical Modeling of the Hydrodynamic Processes of Shallow Water Bodies Taking Into Account the Processes of Salt and Heat Transfer

A.E. Chistyakov<sup>1,2</sup>, A.V. Nikitina<sup>2,3,4</sup>, Y.V. Belova<sup>1</sup>, V.N. Litvinov<sup>1,5</sup>, A.A. Filina<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

<sup>2</sup>Science and Technology University “Sirius”, Olimpiyskiy prospect 1, Sochi, Russia, 354340

<sup>3</sup>Southern Federal University, Bolshaya Sadovaya Str. 105/42, Rostov-on-Don, Russia, 344006

<sup>4</sup>Supercomputers and Neurocomputers Research Center, Italyansky lane 106, Taganrog, Russia, 347900

<sup>5</sup>Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University, Lenina 21, Zernograd, Russia, 347900

**Abstract.** The paper describes a three-dimensional mathematical model of hydrodynamics, taking into account the processes of salt and heat transfer. To approximate the equation of diffusion - convection - reaction in time, we used schemes with weights. The approximation of the problem of calculating the velocity field of the aquatic environment in terms of spatial variables is carried out on the basis of the balance method taking into account the occupancy ratios of the control areas. The stationary modes of the heat and salt transfer problem are investigated. Based on the monitoring of the water area, three-dimensional mathematical models of the movement of the aquatic environment have been built, designed to predict possible scenarios for the development of the Azov Sea ecosystem in order to avoid the occurrence of anaerobic infection areas and take timely measures for their localization. A description is given of a software package that allows modeling hydrodynamic processes in shallow water bodies with complex spatial structures of currents, taking into account the transport of salts and heat.