



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.2>

УДК 519.6  
ББК 26.222

Дата поступления статьи: 22.04.2022  
Дата принятия статьи: 25.06.2022



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЕТРОВЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ПРИБРЕЖНУЮ ЗОНУ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ<sup>1</sup>

**Александр Иванович Сухинов**

Член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,  
заведующий кафедрой математики и информатики,  
Донской государственной технической университет  
[sukhinov@gmail.com](mailto:sukhinov@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-5875-1523>  
пл. Гагарина, 1, 344003 г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Валентина Владимировна Сидорякина**

Кандидат физико-математических наук,  
докторант кафедры математики и информатики,  
Донской государственной технической университет  
[cvv9@mail.ru](mailto:cvv9@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7744-015X>  
пл. Гагарина, 1, 344003 г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Елена Анатольевна Проценко**

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики,  
Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал)  
Ростовского государственного экономического университета  
[earpros@rambler.ru](mailto:earpros@rambler.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7911-3558>  
ул. Инициативная, 48, 347936 г. Таганрог, Российская Федерация

### **Софья Владимировна Проценко**

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики,  
Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал)  
Ростовского государственного экономического университета  
gab55555@rambler.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9656-8466>  
ул. Инициативная, 48, 347936 г. Таганрог, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью настоящей работы является расчет и оценка гидрофизических характеристик ветровых течений крупных водохранилищ. Проведение этих исследований невозможно без использования адекватных динамических математических моделей и построения соответствующих алгоритмов, реализуемых на суперкомпьютерах. Гидродинамическая модель мелководных водоемов разработана на основе трехмерной математической модели, включающей уравнения движения Навье — Стокса по трем координатным направлениям, уравнения неразрывности несжимаемой жидкости, уравнения транспорта тепла и уравнения состояния — зависимости плотности водной среды от температуры. Дискретизация уравнений гидродинамики осуществляется методом поправки к давлению. Разработанные численные алгоритмы и программный комплекс их реализующий используются для исследования поля давления и векторного поля скорости водной среды для заданного участка акватории водоема. Практическая значимость заключается в возможности их применения для изучения гидрофизических процессов этих территорий, оценке гидродинамического воздействия на прибрежную зону крупных водохранилищ.

**Ключевые слова:** крупные водохранилища, ветровые течения, гидродинамика, математическая модель, численные методы, параллельные алгоритмы, численный эксперимент.

### **Введение**

Гидрографическая сеть России не только является значимым естественным фактором жизнеобеспечения, но и чрезвычайно чувствительным и уязвимым элементом окружающей природной среды, постоянно изменяющимся под действием масштабной хозяйственной деятельности человека. Поэтому проблема изучения и рационального использования водных объектов и водных ресурсов, их мониторинг, охрана и восстановление становятся одной из важнейших задач развития государства. При рассмотрении данной проблемы особое место уделяется исследованиям прибрежной зоны внутренних водоемов, в частности водохранилищ, гидрологический режим которых управляется человеком исходя из хозяйственных потребностей и технических приемов его эксплуатации.

Несмотря на важность поддержания оптимального режима функционирования данных водных объектов, на сегодняшний день сложилось немало экологических и экономических проблем, требующих комплексного решения [8; 10; 11; 16]. Так, наиболее серьезное влияние на инфраструктуру побережий водохранилищ оказывает разрушение

берегов. Достаточно большие размеры крупных водохранилищ позволяют образовываться ветровым волнам высотой до 3–4 м, которые, увлекая воду за собой, приводят к достаточно сильным ветровым течениям, ведущим свою разрушительную работу. Для крупных водохранилищ скорость отступления берегов варьирует от 5 м/год в активной стадии процесса разрушения берегов до 1,5 м/год в стадии замедляющегося разрушения.

Для предотвращения развития нежелательных процессов внутри наиболее ценных участков побережья водохранилищ необходим их мониторинг, прогнозирование и проведение комплекса специальных инженерных мероприятий. Наиболее эффективные методы исследований в данной области базируются на определении параметров ветровых течений, поскольку они оказывают существенное воздействие на все элементы гидрологического режима водоемов. Не претендуя на полноту, отметим ряд исследователей, чьи работы посвящены решению проблемы реформирования прибрежных акваторий при эксплуатации крупных водохранилищ с учетом ветро-волновых процессов: Ф.П. Саваренский, И.К. Акимов, С.Л. Вендров, Г.С. Золотарев, Н.Е. Кондратьев, Ф.С. Зубенко, Л.Б. Иконников, Е.Г. Качугин, О.К. Леонтьев, П.И. Печеркин.

На крупных водохранилищах основными факторами, подлежащими учету при гидрофизических расчетах, являются: глубина водоема, сложный рельеф дна, изрезанность и сложность контура береговой линии (наличие мысов, островов и т. п.), характеристики ветрового воздействия, в частности господствующие направления и характерные скорости ветра.

Наиболее достоверные результаты количественных характеристик образованных ветро-волновых процессов дают современные численные прогнозные модели, разработанные на основе нелинейной теории пространственного ветро-волнового движения [2; 12–14; 17]. В последние десятилетия появилось значительное число работ, посвященных моделированию и анализу динамически меняющихся процессов береговой зоны водохранилищ, но эффективность предлагаемых подходов пока далека от практически необходимой. Прежде всего, это связано с использованием весьма ограниченной базы натуральных данных и зачастую узким диапазоном применимости моделей.

Настоящая статья посвящена разработке и исследованию нелинейных моделей гидродинамических процессов, оказывающих влияние на прибрежные акватории крупных водохранилищ. Разработанные алгоритмы решения модельных задач и их численная реализация в виде проблемно-ориентированного программного комплекса имеют широкое практическое применение для исследования воздействия гидродинамических процессов на прибрежную часть и берега водоемов. Эффективность данного подхода продемонстрирована на примере акватории Цимлянского водохранилища. Для «локального» участка, расположенного в юго-западной части водохранилища (рис. 1), проведены исследования таких гидродинамических характеристик, как поле давления и поле вектора скорости водной среды.

Выбор места проведения исследования не случаен. На территории юго-западной части Цимлянского водохранилища сконцентрированы мощные промышленные объекты, среди которых Цимлянская ГЭС, Волгодонской судоходный канал, Волгодонской порт, Донской магистральный канал и др. Наличие этого крупного водного резервуара предопределило выбор места строительства Ростовской атомной электростанции и крупнейшего производственного объединения атомного энергетического машиностроения Атоммаш. Следствием интенсивного хозяйственного освоения водного пространства является усиление негативного воздействия на его экосистему. В последнее десятилетие обострились проблемы, связанные с загрязнением воды, интенсивным размывом и

заилением ложа водохранилища, разрушением берега, снижением проточности, что существенным образом снижает его полезную емкость. Например, на юго-западной части водохранилища более 40 % составляют абразионные берега, 50 % проб воды не отвечает санитарно-гигиеническим нормам. Если к этому добавить неблагоприятную метеорологическую обстановку, то могут возникнуть ситуации, представляющие опасность жизнедеятельности региона. Так, при продолжительных преобладающих в течение всего года ветрах восточного (повторяемость 24 %) и/или северо-восточного (повторяемость 20 %) направлений наблюдаются сгонно-нагонные колебания уровня; максимальная величина которых достигает 1,4 м. В связи с вышесказанным, задача оздоровления водохранилища и разработка методов оценки и прогнозирования нежелательных последствий является весьма актуальной.

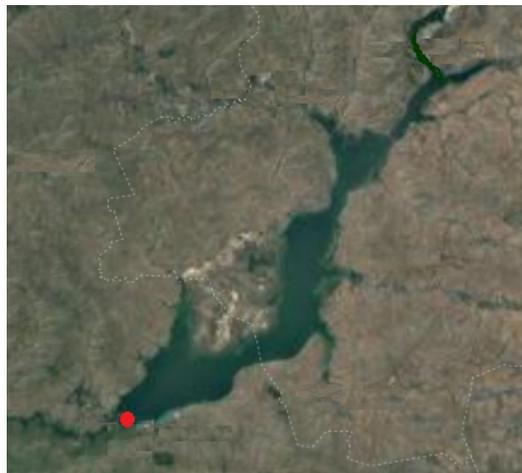


Рис. 1. Схема Цимлянского водохранилища с указанием места моделирования (использована картографическая карта Google, дата обращения 14.02.2022)

### 1. Математическая модель трехмерной волновой гидродинамики

Используем прямоугольную декартову систему координат  $Oxyz$ , где начало координат находится на невозмущенной поверхности водоема. Считаем, что ось  $Ox$  проходит по невозмущенной водной поверхности в направлении на север, ось  $Oy$  — по невозмущенной водной поверхности и направлена на восток, а ось  $Oz$  — вертикально вниз.

Пусть  $G \subset \mathbb{R}^3$  — область водоема и  $\Gamma$  — ее граница, которая является кусочно-гладкой поверхностью,  $\bar{G} = G \cup \Gamma$ .

Используется следующая 3D гидродинамическая модель [3], которая состоит:

- из уравнений движения по трем координатным направлениям (система уравнений Навье — Стокса)

$$u'_t + uu'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho}P'_x + (\mu_h u'_x)'_x + (\mu_h u'_y)'_y + (\mu_v u'_z)'_z, \quad (1)$$

$$v'_t + uv'_x + vv'_y + wv'_z = -\frac{1}{\rho}P'_y + (\mu_h v'_x)'_x + (\mu_h v'_y)'_y + (\mu_v v'_z)'_z, \quad (2)$$

$$w'_t + uw'_x + vw'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho}P'_z + (\mu_h w'_x)'_x + (\mu_h w'_y)'_y + (\mu_v w'_z)'_z + g, \quad (3)$$

где  $(x, y, z) \in G, 0 < t \leq t_{fin}$ ;

— уравнения неразрывности (закон сохранения массы)

$$\rho'_t + (\rho u)'_x + (\rho v)'_y + (\rho w)'_z = 0, \quad (x, y, z) \in G, \quad 0 < t \leq t_{fin}; \quad (4)$$

— уравнения транспорта тепла

$$T'_t + uT'_x + vT'_y + wT'_z = (\mu_h T'_x)'_x + (\mu_h T'_y)'_y + (\mu_v T'_z)'_z, \quad (x, y, z) \in G, \quad 0 < t \leq t_{fin}; \quad (5)$$

— уравнения состояния для плотности

$$\rho = \rho(T), \quad (x, y, z) \in G, \quad 0 < t \leq t_{fin}, \quad (6)$$

где  $\bar{V} = \{u, v, w\}$  — компоненты вектора скорости;  $P$  — давление;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\rho$  — плотность;  $\mu_h, \mu_v$  — горизонтальная и вертикальная составляющие коэффициента турбулентного обмена;  $T$  — температура в конкретной точке области;  $T_0$  — температура, при которой плотность максимальна.

При вычислении значения плотности  $\rho$ , фигурирующего в уравнениях (1)–(6), в силу физических особенностей задачи целесообразно учитывать изменчивость температуры (переменной соленостью можно пренебречь, что справедливо для большинства внутренних водоемов).

Значение плотности может быть описано зависимостью, дающей минимальную погрешность в диапазоне изменения температуры  $T$ . Для этих целей может быть использована широко применяемая на практике приближенная формула П.С. Линейкина [4], которая для случая задачи примет вид:

$$\rho \equiv 1 + 6,98 \cdot 10^{-2}T - 0,918 \cdot 10^{-3}T^2.$$

Система уравнений (1)–(6) в  $(x, y, z) \in \bar{G}$  рассматривается при следующих начальных условиях ( $t = 0$ ):

$$\bar{V} = \bar{V}_0, \quad T = T_0; \quad (7)$$

и граничных условиях [1; 7]:

— на входе (входящие потоки со стороны моря в направлении русла реки)

$$\bar{V} = \bar{V}_0, \quad P'_n = 0, \quad (x, y, z) \in \Gamma, \quad 0 \leq t \leq t_{fin}; \quad (8)$$

— донная граница

$$\rho_v \mu_h (\bar{V}_\tau)'_n = -\bar{\tau}, \quad \bar{V}_n = 0, \quad P'_n = 0, \quad T'_n = 0, \quad (x, y, z) \in \Gamma, \quad 0 \leq t \leq t_{fin}; \quad (9)$$

— боковая граница

$$(\bar{V}_\tau)'_n = 0, \quad \bar{V}_n = 0, \quad P'_n = 0, \quad (x, y, z) \in \Gamma, \quad 0 \leq t \leq t_{fin}; \quad (10)$$

— верхняя граница (граница «вода—воздух»)

$$\rho_v \mu_h (\bar{V}_\tau)'_n = -\bar{\tau}, \quad w = -\frac{1}{\rho g} P'_t, \quad P'_n = 0, \\ \alpha_T T'_z + \beta_T T = Q_T, \quad (x, y, z) \in \Gamma, \quad 0 \leq t \leq t_{fin}; \quad (11)$$

где  $\bar{V}_n, \bar{V}_\tau$  — нормальная и тангенциальная составляющие вектора скорости;  $\bar{n}$  — вектор внешней нормали к боковой и донной поверхностям водоема;  $\bar{\tau} = \{\tau_x, \tau_y, \tau_z\}$  — вектор касательного напряжения;  $\rho_v$  — плотность суспензии;  $\alpha_T, \beta_T, Q_T$  — функции, определяющие теплообмен на свободной поверхности водоема.

На свободной поверхности водоема касательное напряжение  $\bar{\tau}$  рассчитывается следующим образом:

$$\bar{\tau} = \rho_a C d_s |\bar{w}| \bar{w}, \quad (12)$$

где  $\bar{w}$  — вектор скорости ветра относительно воды;  $\rho_a$  — плотность атмосферы;  $C d_s = 0,0026$  — безразмерный коэффициент, который зависит от скорости ветра [5].

На дне водоема касательное напряжение имеет вид

$$\bar{\tau} = \rho C d_b |\bar{V}| \bar{V}, \quad (13)$$

где  $C d_b = \frac{gk^2}{h^{1/3}}$ ;  $k = 0,025$  — групповой коэффициент шероховатости по формуле Мэннинга;  $h$  — расстояние от свободной поверхности до дна.

## 2. Дискретная модель трехмерной гидродинамики

Для численной реализации дискретной математической модели поставленной гидродинамической задачи вводится равномерная сетка:

$$\bar{w}_h = \{t^n = n\tau, x_i = ih_x, y_j = jh_y, z_k = kh_z; n = \overline{0, N_t}, i = \overline{0, N_x}, j = \overline{0, N_y}, k = \overline{0, N_z}; N_t\tau = l_t, N_x h_x = l_x, N_y h_y = l_y, N_z h_z = l_z\},$$

где  $\tau$  — шаг по времени;  $h_x, h_y, h_z$  — шаги по пространству;  $N_t$  — количество временных слоев;  $l_t$  — верхняя граница временной координаты;  $N_x, N_y, N_z$  — количество узлов по пространственным координатам;  $l_x, l_y, l_z$  — границы вдоль ребер параллелепипеда в направлении осей  $Ox, Oy$  и  $Oz$  соответственно. Для задания сложной формы граничной поверхности, включая боковую поверхность и дно, используется функция заполненности ячеек [6].

Для дискретизации модели (1)–(13) применим расщепление по физическим процессам — метод поправки к давлению, который гарантирует на дискретном уровне выполнение закона сохранения массы на каждом временном слое. Согласно данному методу процесс численного моделирования предполагает на каждом временном шаге решение четырех задач.

Первая задача заключается в расчете поля вектора скорости жидкости без учета давления на основе системы уравнений диффузии — конвекции:

$$\frac{\tilde{u} - u}{\tau} + uu'_x + vv'_y + ww'_z = (\mu_h \bar{u}'_x)'_x + (\mu_h \bar{u}'_y)'_y + (\mu_v \bar{u}'_z)'_z, \quad (14)$$

$$\frac{\tilde{v} - v}{\tau} + uv'_x + vv'_y + ww'_z = (\mu_h \bar{v}'_x)'_x + (\mu_h \bar{v}'_y)'_y + (\mu_v \bar{v}'_z)'_z, \quad (15)$$

$$\frac{\tilde{w} - w}{\tau} + uw'_x + vv'_y + ww'_z = (\mu_h \bar{w}'_x)'_x + (\mu_h \bar{w}'_y)'_y + (\mu_v \bar{w}'_z)'_z + g\left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1\right), \quad (16)$$

где  $\{u, v, w\}$  — компоненты вектора скорости на предыдущем временном слое;  $\{\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}\}$  — компоненты вектора скорости на промежуточном временном слое;  $\bar{u} = \sigma \tilde{u} + (1 - \sigma)u$ ;  $\sigma \in [0; 1]$  — вес схемы.

Вторая задача предполагает решение сеточного уравнения Пуассона и позволяет вычислить значения давления в каждом узле расчетной области

$$P''_{xx} + P''_{yy} + P''_{zz} = \frac{\hat{\rho} - \rho}{\tau^2} + \frac{1}{\tau} \left( (\hat{\rho}\tilde{u})'_x + (\hat{\rho}\tilde{v})'_y + (\hat{\rho}\tilde{w})'_z \right). \quad (17)$$

Далее компоненты вектора скорости водной среды корректируются в процессе решения третьей задачи, с учетом распределения давлений, полученного на основе численного решения уравнения (17), что гарантирует выполнение закона сохранения массы в используемой дискретной модели. Для этого используются явные схемы для расчета компонентов вектора скорости

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

где  $\{\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}\}$  — компоненты вектора скорости на текущем временном слое.

Для решения четвертой задачи используются расчетные схемы с кососимметрической аппроксимацией конвективных членов, предложенные в [18] (в силу их громоздкого изложения в рамках статьи не приводятся).

Степень заполнения  $o_{i,j,k}$  ячейки  $(i, j, k)$  рассчитывается через давление столба жидкости на дно и позволяет учесть сложный характер боковой граничной поверхности водоема:

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

Введем коэффициенты  $q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ , описывающие объем жидкости (VOF) областей, расположенных в окрестности ячейки (контрольных областей).

В случае граничных условий третьего рода  $\frac{\partial c(x,y,t)}{\partial n} = \alpha_n c + \beta_n$  дискретные аналоги конвективных  $u \frac{\partial c}{\partial x}$  и диффузионных  $\mu_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$  переносов, полученные при помощи интегроинтерполяционного метода, учитывающие частичную заполненность ячеек, могут быть записаны в следующем виде [9]:

$$(q_0)_i u \frac{\partial c}{\partial x} \simeq (q_1)_i u_{i+1/2} \frac{c_{i+1} - c_i}{2h_x} + (q_2)_i u_{i-1/2} \frac{c_i - c_{i-1}}{2h_x},$$

$$(q_0)_i \mu_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \simeq (q_1)_i \mu_h \frac{c_{i+1} - c_i}{h_x^2} - (q_2)_i \mu_h \frac{c_i - c_{i-1}}{h_x^2} - \left| (q_1)_i - (q_2)_i \right| \mu_h \frac{\alpha_x c_i + \beta_x}{h_x}.$$

Аналогичным образом запишутся аппроксимации по оставшимся координатным направлениям. Для оценки точности численного решения задач гидродинамики на основе предложенных схем были выполнены теоретические оценки и тестовые расчеты. Оценка погрешности аппроксимации на прямоугольной сетке с учетом функции заполненности ячеек есть величина  $O(\tau + \|h\|^2)$ , где  $\|h\| = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2}$ . Доказано сохранение потоков течений на дискретном уровне для разработанной гидродинамической модели, а также отсутствие других неконсервативных членов, полученных в результате дискретизации системы уравнений. Достаточное условие монотонности используемой модели

определяется на основе принципа максимума [9] с ограничениями на шаг по пространственным координатам:  $h_x < |\frac{2\mu_h}{u}|$ ,  $h_y < |\frac{2\mu_h}{\mu_v}|$ ,  $h_z < |\frac{2\mu_v}{w}|$  или  $Re \leq 2N$ , где  $Re$  — число Рейнольдса,  $l$  — характерный размер области,  $N = \max\{N_x, N_y, N_z\}$ . Дискретные аналоги системы уравнений (14)–(19) решаются адаптивным модифицированным попеременно-треугольным методом вариационного типа [15; 19; 20].

### 3. Описание программного комплекса

Для реализации модельных задач гидродинамики разработан программный комплекс, созданный на языке C++. Реализованные в программном комплексе параллельные алгоритмы решения модельных задач систем сеточных уравнений, возникающих в процессе дискретизации модифицированным адаптивным переменным-треугольным методом вариационного типа, разработаны с использованием технологии MPI. На рисунке 2 представлена схема алгоритма программы, численно реализующая разработанные трехмерные модели волновой гидродинамики.



Рис. 2. Алгоритм работы программного комплекса

В состав разработанного программного комплекса входят: блок управления (содержит цикл по переменной времени, а функции называются: расчет поля скоростей без учета функции возвышения, расчет функции возвышения скорости, расчет двумерного поля скоростей, проверка наличия конструкции на поверхности водной среды и вывод данных); блок ввода начальных распределений для расчета скорости течений и функции возвышения уровня (задаются начальные распределения поля скорости и функции возвышения уровня и начальные значения степени заполнения расчетных ячеек); блок построения сеточных уравнений для трехмерных полей расходов воды без напора; блок построения сеточных уравнений для расчета поля давления и функции возвышения уровня; блок проверки наличия на поверхности водной среды конструкции; блок расчета поля скоростей с учетом давления; блок решения сеточных уравнений модифицированным адаптивным попеременно-треугольным методом вариационного типа; блок выходных значений поля скоростей и функции давления (уровень функции возвышения поля).

#### 4. Результаты численных экспериментов

Для проведения численных экспериментов в крайне юго-западном углу Цимлянско-го водохранилища выделен участок вблизи Волгодонского порта. Геометрически данная модельная область характеризуется сложной конфигурацией береговой линии. «Локальный» участок моделирования имеет следующие данные: размеры —  $5 \cdot 10^3 \times 5 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>, максимальная глубина — 8 м, пиковая точка возвышения над уровнем моря — 2 м. Источник возмущений будем задавать на некотором расстоянии от береговой линии. Пусть на участке моделирования жидкость находится в состоянии покоя в начальный момент моделирования.

В первую очередь была выполнена подготовка входных данных. Построена цифровая модельная область, которая отображает карту глубин и изолинии функции глубин поверхности дна и линии берега (см. рис. 3, 4).

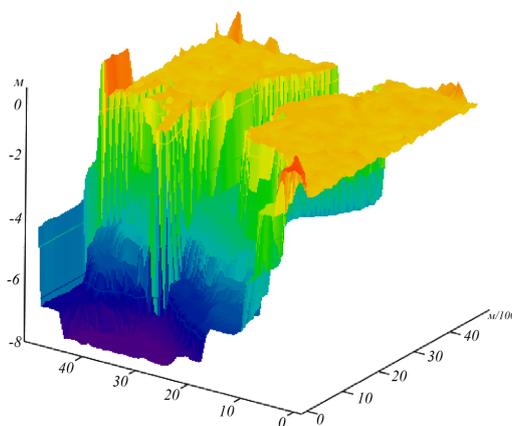


Рис. 3. Карта с изображениями глубин вычислительной области

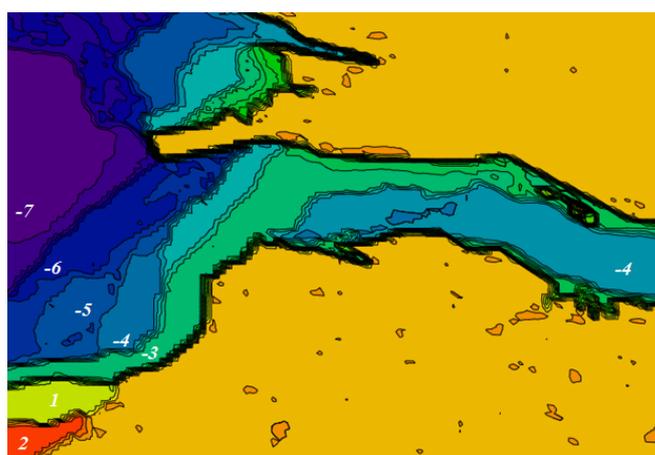


Рис. 4. Изолинии функции глубин линии берега и поверхности дна

В ходе эксперимента была построена равномерная сетка, ячейки которой составляют около 50 м по горизонтали и 0,2 м по вертикали. Сетка имеет размер  $100 \times 100 \times 40$ .

Далее проводилась интерполяция входных данных о показаниях глубины расчетной области на построенную сетку. Результаты расчета поля давления продемонстрированы на рисунке 5.

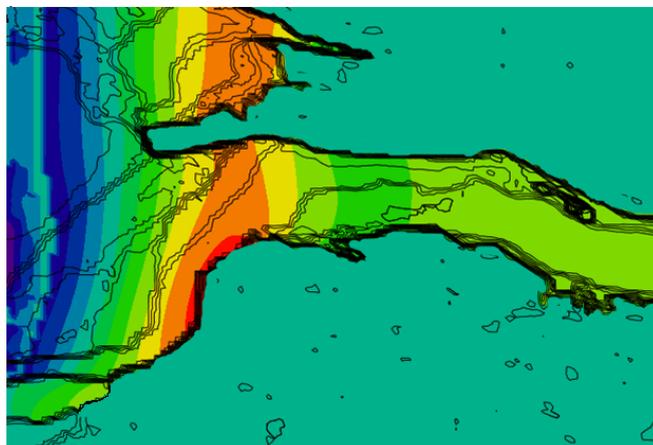


Рис. 5. Результаты расчета поля давления [кПа]

Прогнозирование динамически изменяющегося барического поля водной среды выполнено для центра модельной области (рис. 6), в случае возникновения волн с высотой 2 м, распространяющихся в направлении берега. Изобары, отображающие барическое поле, представляют сильно вытянутые кривые, по форме близкие к синусоиде. На рисунке 6 видно, что в направлении роста давления (в сторону берега) происходит смещение изобар. Разрывы на кривых объясняются тем, что в некоторых ячейках расчетной сетки давление не рассчитывается. Это происходит при моделировании участков с выступающими участками суши.

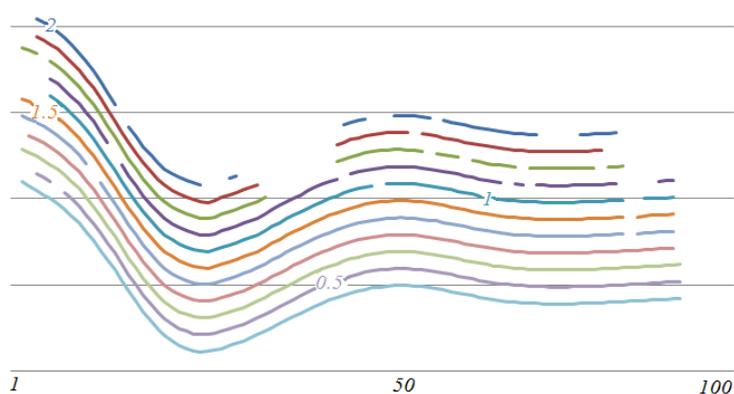


Рис. 6. Динамически изменяющееся барическое поле водной среды в центре расчетной области

На рисунке 7 представлен результат расчета векторного поля скоростей при скорости ветра 5 м/с. Эксперимент выполнен для сложной области, которая содержит канал с внезапным сужением. При геометрической неоднородности участка происходит значительное изменение вектора скорости движения водного потока. Это наглядно можно увидеть, когда происходит накат волны заданной начальной высоты в направлении к берегу. В канале, где происходит сужение водной акватории, трансформируется функция

возвышения уровня. Здесь в физической области наблюдаются зоны затопления и обмеления. На фоне волнового микротурбулентного обмена, возникающего перед уступом суши, зарождается вихреобразование.

Для получения представления полной картины скоростного поля выполнены различные сечения расчетной области плоскостью  $Oxz$ . На рисунке 7 представлены профили горизонтальной скорости движения водной среды в построенных сечениях.

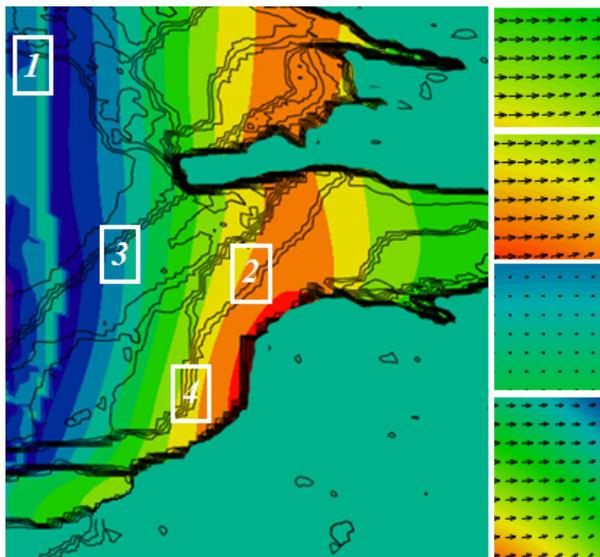


Рис. 7. Поле вектора скорости водной среды на различных участках расчетной области

Проведенные с помощью математической модели расчеты волнового воздействия выявили участки, наиболее подверженные ветро-волновому воздействию. При господствующих в этом регионе направлениях ветра и его характерных скоростях на этом прибрежном участке Цимлянского водохранилища наблюдается значительное гидродинамическое воздействие, при котором существенны скорости течений по направлению к берегу и перепады давлений в водной среде вблизи берега, что подтверждается выполненными численными экспериментами.

При действии затянувшихся северо-восточных ветров возникают потенциально опасные гидродинамические явления. Ярким подтверждением этому служит ситуация, сложившаяся в прибрежной зоне Цимлянского водохранилища вблизи города Волгодонска в октябре 2009 г., когда в результате длительного воздействия сильных ветров (18 м/с и более) восточного и северо-восточного направлений, а также аномальной термической картины (среднемесячные показатели температуры превышали норму на  $4,7^{\circ}\text{C}$  для воздуха и на  $2,4^{\circ}\text{C}$  для воды) и нагонных явлений наблюдалось обрушение берега и проникновение больших масс микроводорослей и донного взвешенного вещества в водозаборные сооружения и прекращение водоснабжения Волгодонска. Разработанный программно-алгоритмический инструментарий целесообразно использовать при планировании комплекса берегозащитных мероприятий.



Рис. 8. Состояние береговой зоны юго-западной части Цимлянского водохранилища: современное (фото слева) и до 2009 года (фото справа)

### Заключение

Построенные гидродинамическая модель и комплекс программ учитывают специфические особенности водоема и гидрометеоусловия, среди которых скорость и направление ветра, уровневый режим, сложная геометрия линии берега, рельеф дна и др.

Проведенное исследование показывает, что построенная авторами 3D-модель и ее программная реализация позволяют успешно прогнозировать воздействие течений, в том числе волновых, на прибрежную часть крупного водоема, которые согласуются с наблюдаемыми явлениями, в том числе с эрозией определенных участков берега крупнейшего водохранилища Юга России — Цимлянского водохранилища, что подтверждает целесообразность их применения.

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00421\_а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоцерковский, О. М. Турбулентность: новые подходы / О. М. Белоцерковский, А. М. Опарин, В. М. Чечеткин. — М. : Наука, 2002. — 286 с.
2. Вуглинский, В. С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР / В. С. Вуглинский. — Л. : Гидрометеоиздат, 1991. — 222 с.
3. Комплекс объединенных моделей транспорта наносов и взвесей с учетом трехмерных гидродинамических процессов в прибрежной зоне / А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко, В. В. Сидорякина, С. В. Проценко // Матем. моделирование. — 2020. — № 32 (2). — С. 3–23. — DOI: <https://doi.org/10.20948/mm-2020-02-01>
4. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана / Г. И. Марчук, В. П. Дымников, В. Б. Залесный, В. Н. Лыкосов, В. Я. Галин. — Л. : Гидрометеоиздат, 1984. — 320 с.
5. Метод учета заполненности ячеек для решения задач гидродинамики со сложной геометрией расчетной области / А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко, В. В. Сидорякина, С. В. Проценко // Матем. моделирование. — 2019. — Т. 31, № 8. — С. 79–100. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S0234087919080057>

6. Параллельные алгоритмы решения задачи динамики изменения рельефа дна в прибрежных системах / А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко, В. В. Сидорякина, С. В. Проценко // Вычислительные методы и программирование. — 2020. — Т. 21. — С. 196–206. — DOI: 10.26089/NumMet.v21r318
7. Показеев, К. В. Океанология. Оптика океана / К. В. Показеев, Т. О. Чаплина. — М. : Юрайт, 2018. — 270 с.
8. Развертывание региональной климатической модели для Юга России на основе RegCM 4.5 / А. В. Хоперсков, К. М. Фирсов, А. В. Титов, А. А. Размоллов // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2019. — Т. 22, № 3. — С. 68–95. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.3.6>
9. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. — М. : Наука, 1978. — 592 с.
10. Сидорякина, В. В. Исследование корректности и численная реализация линеаризованной двумерной задачи транспорта наночастиц / В. В. Сидорякина, А. И. Сухинов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. — 2017. — Т. 57 (6). — С. 985–1002. — DOI: <http://doi.org/10.7868/S0044466917060138>
11. Численная модель динамики поверхностных вод в русле Волги: оценка коэффициента шероховатости / А. В. Писарев, С. С. Храпов, Е. О. Агафонникова, А. В. Хоперсков // Вестн. Удмурт. ун-та. Матем. Мех. Компют. науки. — 2013. — Т. 1. — С. 114–130.
12. Flood-Based Analysis of High-Magnitude Sediment Transport Using a Non-Parametric Method / T. Francke, J. A. Lopez-Tarazon, D. Vericat, A. Bronstert, R. J. Batalla // Earth Surface Processes and Landforms. — 2008. — Vol. 33 (13). — P. 2064–2077. — DOI: <http://doi.org/10.1002/esp.1654>
13. Ouda, M. Development of a New Multiphase Sediment Transport Model for Free Surface Flows / M. Ouda, E. A. Toorman // International Journal of Multiphase Flow. — 2019. — Vol. 117. — P. 81–102.
14. Predictive Modeling in Sediment Transportation Across Multiple Spatial Scales in the Jialing River Basin of China / X. Liu, S. Qi, Y. Huang, Y. Chen, P. Du // International Journal of Sediment Research. — 2015. — Vol. 30 (3). — P. 250–255.
15. 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 // Math. Models and Comput. Simul. — 2018. — Vol. 10. — P. 648–658. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048218050125>
16. Reservoir Sedimentation / A. J. Schleiss, M. J. Franca, C. Juez, G. De Cesare // Journal of Hydraulic Research. — 2016. — Vol. 54, iss. 6. — P. 595–614. — DOI: <http://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>
17. Soil Erosion and Deposition in the New Shorelines of the Three Gorges Reservoir / X. Su, C. Nilsson, F. Pilotto, S. Liu, S. Shi, B. Zeng // Sci. Total Environ. — 2017. — Vol. 599–600. — P. 1485–1492. — DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.001>
18. Sukhinov, A. I. Adaptive Modified Alternating Triangular Iterative Method for Solving Grid Equations with a Non-Self-Adjoint Operator / A. I. Sukhinov, A. E. Chistyakov // Mathematical Models and Computer Simulations. — 2012. — Vol. 4 (4). — P. 398–409.
19. Sukhinov, A. I. Error Estimation for the Diffusion Equation Solution Based on the Schemes with Weights / A. I. Sukhinov, A. E. Chistyakov, A. V. Shishenya // Matem. Mod. — 2013. — Vol. 25 (11). — P. 53–64.
20. Sukhinov, A. I. Increasing Efficiency of Alternating Triangular Method Based on Improved Spectral Estimates / A. I. Sukhinov, A. V. Shishenya // Math. Models and Comput. Simul. — 2013. — Vol. 5. — P. 257–265. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048213030101>

## REFERENCES

1. Belotserkovskiy O.M., Oparin A.M., Chechetkin V.M. *Turbulentnost: novye podkhody* [Turbulence: New Approaches]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 286 p.

2. Vuglinskiy V.S. *Vodnye resursy i vodnyy balans krupnykh vodokhranilishch SSSR* [Water Resources and Water Balance of Large Reservoirs of the USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991. 222 p.

3. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A., Sidoryakina V.V., Protsenko C.B. Kompleks obyedinennykh modeley transporta nanosov i vzvesey s uchetom trekhmernykh gidrodinamicheskikh protsessov v pribrezhnoy zone [Set of Coupled Transport Models of Suspended Matter, Taking Into Account Three-Dimensional Hydrodynamic Processes in the Coastal Zone]. *Matem. modelirovanie*, 2020, no. 32 (2), pp. 3-23. DOI: <https://doi.org/10.20948/mm-2020-02-01>

4. Marchuk G.I., Dymnikov V.P., Zalesnyy V.B., Lykosov V.N., Galin V.Ya. *Matematicheskoe modelirovanie obshchey tsirkulyatsii atmosfery i okeana* [Mathematical Modeling of the General Circulation of the Atmosphere and Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984. 320 p.

5. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A., Sidoryakina V.V., Protsenko C.V. Metod ucheta zapolnennosti yacheek dlya resheniya zadach gidrodinamiki so slozhnoy geometriey raschetnoy oblasti [Accounting Method of Filling Cells for the Solution of Hydrodynamics Problems with a Complex Geometry of the Computational Domain]. *Matem. modelirovanie*, 2019, vol. 31, no. 8, pp. 79-100. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0234087919080057>

6. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A., Sidoryakina V.V., Protsenko C.B. Parallelnye algoritmy resheniya zadachi dinamiki izmeneniya relyefa dna v pribrezhnykh sistemakh [Parallel Algorithms for Solving the Problem of Coastal Bottom Relief Dynamics]. *Vychislitelnye metody i programmirovaniye*, 2020, vol. 21, pp. 196-206. DOI: [10.26089/NumMet.v21r318](https://doi.org/10.26089/NumMet.v21r318)

7. Pokazeev K.V., Chaplina T.O. *Okeanologiya. Optika okeana* [Oceanology. Optics of the Ocean]. Moscow, Yurayt Publ., 2018. 270 p.

8. Khoperskov A.V., Firsov K.M., Titov A.V., Razmolov A.A. Razvertyvanie regionalnoy klimaticheskoy modeli dlya Yuga Rossii na osnove RegCM 4.5 [Deployment of the Regional Climate Model for the South of Russia Based on RegCM 4.5]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 68-95. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.3.6>

9. Samarskiy A.A., Nikolaev E.S. *Metody resheniya setochnykh uravneniy* [Methods for Solving the Grid Equations]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 592 p.

10. Sidoryakina V.V., Sukhinov A.I. Issledovanie korrektnosti i chislennaya realizatsiya linearizovannoy dvumernoy zadachi transporta nanosov [Well-Posedness Analysis and Numerical Implementation of a Linearized Two-Dimensional Bottom Sediment Transport Problem]. *Zh. vychisl. matem. i matem. fiz.* [Comput. Math. Math. Phys.], 2017, vol. 57 (6), pp. 985-1002. DOI: <http://doi.org/10.7868/S0044466917060138>

11. Pisarev A.V., Khrapov S.S., Agafonnikova E.O., Khoperskov A.V. Chislennaya model dinamiki poverkhnostnykh vod v rusle Volgi: otsenka koeffitsienta sherokhovatosti [Numerical Model of Surface Water Dynamics in the Volga Channel: Estimation of the Roughness Coefficient]. *Vestn. Udmurt. un-ta. Matem. Mekh. Kompyut. nauki*, 2013, vol. 1, pp. 114-130.

12. Francke T., Lopez-Tarazon J.A., Vericat D., Bronstert A., Batalla R.J. Flood-Based Analysis of High-Magnitude Sediment Transport Using a Non-Parametric Method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, vol. 33 (13), pp. 2064-2077. DOI: <http://doi.org/10.1002/esp.1654>

13. Ouda M., Toorman E.A. Development of a New Multiphase Sediment Transport Model for Free Surface Flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, vol. 117, pp. 81-102.

14. Liu X., Qi S., Huang Y., Chen Y., Du P. Predictive Modeling in Sediment Transportation Across Multiple Spatial Scales in the Jialing River Basin of China. *International Journal of Sediment Research*, 2015, vol. 30 (3), pp. 250-255.

15. 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. *Math. Models and Comput. Simul.*, 2018, vol. 10, pp. 648-658. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048218050125>

16. Schleiss A.J., Franca M.J., Juez C., De Cesare G. Reservoir Sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 2016, vol. 54, iss. 6, pp. 595-614. DOI: <http://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>

17. Su X., Nilsson C., Pilotto F., Liu S., Shi S., Zeng B. Soil Erosion and Deposition in the New Shorelines of the Three Gorges Reservoir. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 599-600, pp. 1485-1492. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.001>

18. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E. Adaptive Modified Alternating Triangular Iterative Method for Solving Grid Equations with a Non-Self-Adjoint Operator. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2012, vol. 4 (4), pp. 398-409.

19. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Shishenya A.V. Error Estimation for the Diffusion Equation Solution Based on the Schemes with Weights. *Matem. Mod.*, 2013, vol. 25 (11), pp. 53-64.

20. Sukhinov A.I., Shishenya A.V. Increasing Efficiency of Alternating Triangular Method Based on Improved Spectral Estimates. *Math. Models and Comput. Simul.*, 2013, vol. 5, pp. 257-265. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048213030101>

## WIND CURRENTS EFFECTS NUMERICAL SIMULATION ON THE COASTAL ZONE OF LARGE RESERVOIRS

**Alexander I. Sukhinov**

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Head of Department of the Department of Mathematics and Computer Science,  
Don State Technical University  
[sukhinov@gmail.com](mailto:sukhinov@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-5875-1523>  
Gagarina Sq., 1, 344002 Rostov-on-Don, Russian Federation

**Valentina V. Sidoryakina**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Doctoral Student,  
Department of Mathematics and Computer Science,  
Don State Technical University  
[cvv9@mail.ru](mailto:cvv9@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7744-015X>  
Gagarina Sq., 1, 344002 Rostov-on-Don, Russian Federation

**Elena A. Protsenko**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Department of Mathematics,  
Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics  
[eapros@rambler.ru](mailto:eapros@rambler.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7911-3558>  
Initiative St, 48, 347936 Taganrog, Russian Federation

**Sofya V. Protsenko**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Department of Mathematics,  
Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics  
rab55555@rambler.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9656-8466>  
Initiative St, 48, 347936 Taganrog, Russian Federation

**Abstract.** Calculation and evaluation of wind currents hydrophysical characteristics of large reservoirs is the purpose of this work. Adequate dynamic mathematical models are necessary for conducting these studies and constructing appropriate algorithms implemented on supercomputers. The shallow water reservoirs hydrodynamic model is developed on the basis of three-dimensional mathematical model that includes the Navier — Stokes equations of motion in three coordinate directions, the equations of continuity of an incompressible fluid, the equations of heat transport and the equations of state or the density dependence of the aqueous medium on temperature. The discretization of the hydrodynamic equations is carried out by the pressure correction method. The developed numerical algorithms and the software package that implements them are used to study the pressure field and the aquatic medium velocity vector field for a given section of the reservoir water area. The practical significance lies in the possibility of their application for studying the hydrophysical processes of these territories, assessing the hydrodynamic impact on the large reservoirs coastal zone.

**Key words:** large reservoirs, wind currents, hydrodynamics, mathematical model, numerical methods, parallel algorithms, numerical experiment.