

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MATHEMATICAL MODELLING



УДК 519.6

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-2-33-44>


Математическое моделирование катастрофических сгонно-нагонных явлений Азовского моря с использованием данных дистанционного зондирования

Е.А. Проценко¹ , Н.Д. Панасенко^{1,2} , С.В. Проценко¹ ¹Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) РГЭУ (РИНХ), г. Таганрог, Российская Федерация²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация✉ eapros@rambler.ru

Аннотация

Введение. Работа посвящена математическому моделированию экстремальных колебаний уровня Азовского моря с использованием данных дистанционного зондирования. Цель исследования заключается в разработке и применении математической модели, которая позволяет более точно прогнозировать сгонно-нагонные явления, вызванные экстремальными ветровыми условиями. Актуальность работы обусловлена необходимостью улучшения прогнозов гидродинамических процессов в мелководных водоемах (таких, как Азовское море), где подобные явления могут иметь значительные экономические и экологические последствия. Цель данной работы — разработка и применение математической модели для прогнозирования экстремальных колебаний уровня Азовского моря, вызванных ветровыми условиями.

Материалы и методы. Исследование основывается на анализе данных дистанционного зондирования и наблюдений за скоростью и направлением ветра над Азовским морем. В качестве основного метода используется математическое моделирование, включающее решение системы уравнений волновой гидродинамики для мелководного водоема. Данные о ветровых условиях были собраны в период с 20 по 25 ноября 2019 года, когда наблюдались катастрофические колебания уровня моря. Модель учитывает компоненты скорости водного потока, плотность водной среды, гидродинамическое давление, ускорение свободного падения и коэффициенты турбулентного обмена.

Результаты исследования. Моделирование показало, что продолжительное действие восточного ветра со скоростью до 22 м/с привело к значительным сгонно-нагонным колебаниям уровня моря. Максимальные амплитуды колебаний были зафиксированы в центральной части Таганрогского залива, где направление и скорость ветра оставались практически неизменными в течение всего периода наблюдений. Данные с различных платформ, расположенных в разных частях Азовского моря, подтвердили наличие значительного снижения уровня воды на северо-востоке и повышения на юго-западе.

Обсуждение и заключения. Результаты исследования подтверждают, что использование математических моделей в сочетании с данными дистанционного зондирования позволяет более точно прогнозировать экстремальные колебания уровня моря. Это имеет важное значение для разработки мер по предупреждению и минимизации последствий сгонно-нагонных явлений в прибрежных районах. В дальнейшем необходимо совершенствовать модели, включая дополнительные факторы, такие как изменение климатических условий и антропогенное воздействие на экосистему Азовского моря.

Ключевые слова: математическое моделирование, колебания уровня моря, данные дистанционного зондирования, сгонно-нагонные явления, гидродинамика

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00210, <https://rscf.ru/project/23-21-00210/>

Для цитирования. Проценко Е.А., Панасенко Н.Д., Проценко С.В. Математическое моделирование катастрофических сгонно-нагонных явлений Азовского моря с использованием данных дистанционного зондирования. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2024;8(2):33–44. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-2-33-44>

Mathematical Modelling of Catastrophic Surge and Seiche Events in the Azov Sea Using Remote Sensing Data

Elena A. Protsenko¹  , Natalya D. Panasenko^{1,2} , Sofia V. Protsenko¹ 

¹Taganrog Institute named after A.P. Chekhov (branch) of RSUE, Taganrog, Russian Federation

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ capros@rambler.ru

Abstract

Introduction. This work is devoted to the mathematical modelling of extreme sea level fluctuations in the Azov Sea using remote sensing data. The aim of the study is to develop and apply a mathematical model that allows more accurate prediction of surge and seiche events caused by extreme wind conditions. The relevance of the work is due to the need to improve the forecasts of hydrodynamic processes in shallow water bodies (such as the Azov Sea), where such phenomena can have significant economic and ecological consequences. The goal of this work is to develop and apply a mathematical model for predicting extreme sea level fluctuations in the Azov Sea caused by wind conditions.

Materials and Methods. The study is based on the analysis of remote sensing data and observations of wind speed and direction over the Azov Sea. The primary method used is mathematical modelling, which includes solving the system of shallow water hydrodynamics equations. Wind condition data were collected from November 20 to 25, 2019, during which catastrophic sea level fluctuations were observed. The model considers the components of water flow velocity, water density, hydrodynamic pressure, gravitational acceleration, and turbulence exchange coefficients.

Results. The modelling showed that prolonged easterly winds with speeds up to 22 m/s led to significant surge and seiche fluctuations in sea level. The maximum amplitudes of fluctuations were recorded in the central part of the Taganrog Bay, where the wind direction and speed remained almost constant throughout the observation period. Data from various platforms located in different parts of the Azov Sea confirmed a significant decrease in water level in the northeast and an increase in the southwest.

Discussion and Conclusions. The study results confirm that using mathematical models in combination with remote sensing data allows more accurate predictions of extreme sea level fluctuations. This is important for developing measures to prevent and mitigate the consequences of surge and seiche events in coastal areas. In the future, it is necessary to improve models by including additional factors such as climate change and anthropogenic impact on the Azov Sea ecosystem.

Keywords: mathematical modelling, sea level fluctuations, remote sensing data, surge and seiche events, hydrodynamics

Funding information. The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-21-00210, <https://rscf.ru/project/23-21-00210/>

For citation. Protsenko E.A., Panasenko N.D., Protsenko S.V. Mathematical modelling of catastrophic surge and seiche events in the Azov Sea using remote sensing data. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2024;8(2):33–44. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-2-33-44>

Введение. Азовское море, являясь мелководным водоемом, подвержено значительным колебаниям уровня воды под влиянием ветровых условий. Эти колебания могут иметь серьезные экономические и экологические последствия для прибрежных районов, включая затопления и разрушения инфраструктуры. Несмотря на важность понимания и прогнозирования таких явлений, существующие модели не всегда учитывают все необходимые факторы, что приводит к недостаточной точности прогнозов [1–5].

Цель данного исследования заключается в разработке и применении математической модели для прогнозирования экстремальных колебаний уровня Азовского моря, вызванных ветровыми условиями. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания точных и надежных инструментов для прогнозирования сгонно-нагонных явлений, что позволит разработать эффективные меры по предупреждению и минимизации их негативных последствий. С учетом увеличивающейся частоты экстремальных погодных явлений в связи с изменением климата задача разработки таких моделей становится особенно важной.

Катастрофические сгонно-нагонные явления Азовского моря представляют серьезную угрозу для прибрежных населённых пунктов и экологии региона. Для их прогнозирования и предупреждения необходимо использовать математическое моделирование. Для полноценной работы этих моделей нужны не только натурные данные, но и данные дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли. В настоящей работе авторы рассматривают различные подходы к математическому моделированию сгонно-нагонных явлений Азовского моря на основе данных дистанционного зондирования.

Научная новизна работы заключается в использовании данных дистанционного зондирования в сочетании с усовершенствованными методами математического моделирования. Это позволяет более точно учитывать динамические изменения в водной среде и ветровых условиях, что способствует улучшению прогностической способности моделей. В работе представлены новые подходы к аппроксимации коэффициентов турбулентного обмена и организации вычислительного эксперимента, что значительно повышает точность и надежность получаемых результатов.

Материалы и методы

1. Объект исследования. В течение года над Азовским морем преобладают слабые ветры. Их повторяемость составляет 60–70 %, доля умеренных ветров — 20 %, сильных — около 10 %. Ветер со скоростью 20–24 м/с может отмечаться в любое время года, а со скоростью больше 24 м/с только в период с октября по апрель. Ветры со скоростью больше 14 м/с имеют преимущественно северо-восточное и восточное направление.

В период с 20 ноября 2019 г. по 25 ноября 2019 г. в акватории Азовского моря наблюдались катастрофические сгонно-нагонные колебания, которые были вызваны продолжительным действием восточного ветра. Анализ розы ветров, рассчитанной для центральной части Таганрогского залива с 19 по 25 ноября, показывает, что направление скорости ветра оставалось практически неизменным (рис. 1). Максимальная скорость ветра достигала 19–22 м/с, при том, что преобладающими для побережья и открытой части Азовского моря являются ветра со скоростью 4,5–5,5 м/с на побережье и 7,5 м/с в центральной части. По данным с 27 ноября 2019 г. наблюдалось постепенное уменьшение скорости ветра и, соответственно, постепенное уменьшение амплитуды сгонно-нагонных колебаний.

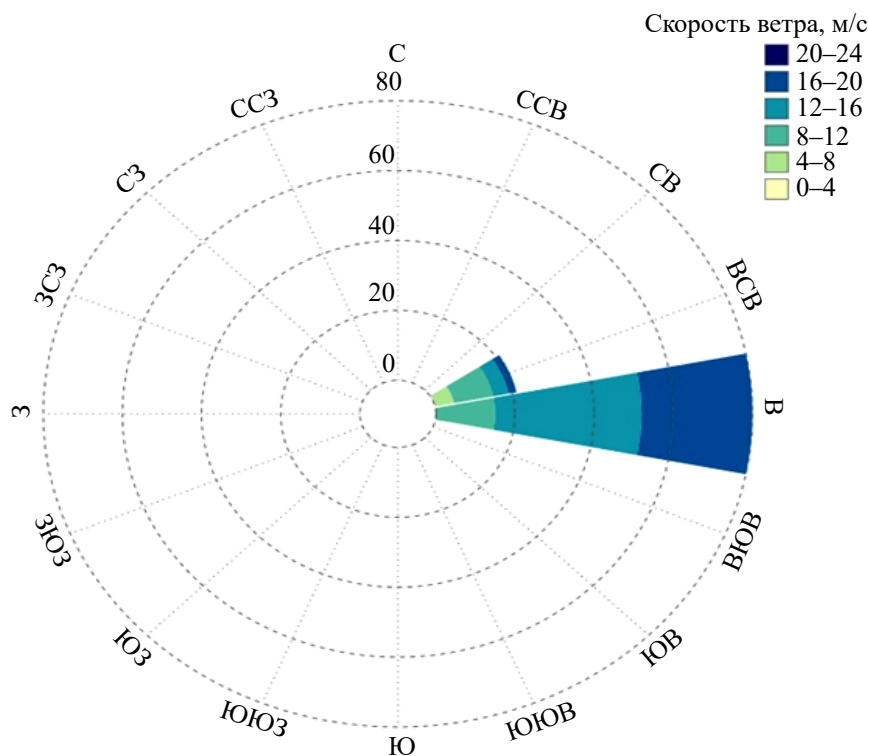


Рис. 1. Роза ветров в центральной части Азовского моря с 19 по 24 ноября 2019 г.



Рис. 2. Карта глубин Азовского моря с отмеченными ГМС Таганрог (1), Очаковская коса (2), Ейск-порт (3), Должанская (4), Мысовое (5)

Скорость ветра зависит прежде всего от барического градиента и характера подстилающей поверхности. Последний фактор обуславливает значительное увеличение средней скорости ветра над открытым морем по сравнению со средней скоростью ветра на побережье. Такое увеличение вызвано малым трением воздушного потока о водную поверхность, причем скорость ветра, зафиксированная на береговых станциях несколько ниже, чем на удаленных от берега.

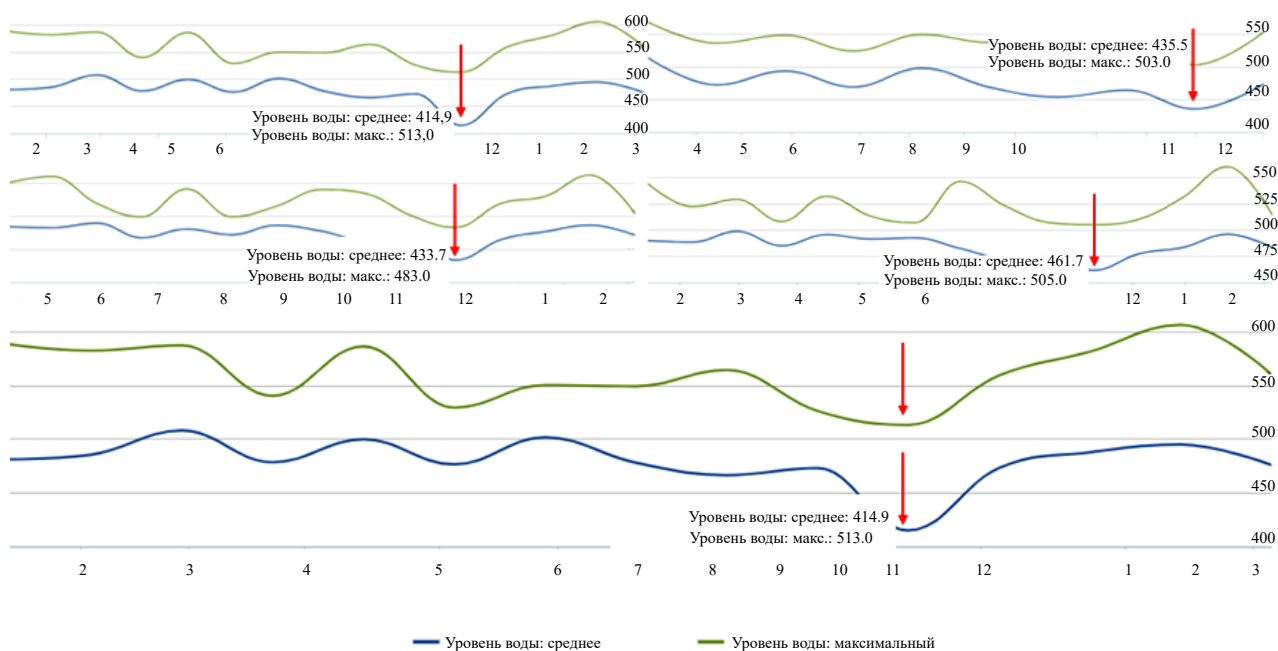


Рис. 3. Уровень моря на береговых ГМС Таганрог, Очаковская коса, Ейск-порт, Должанская в 2019 году

Прибрежный массив среднемесячных значений уровня моря содержит среднемесячные данные по уровню моря, измеренному по рейке, на береговых ГМС Азовского моря. Данные с четырёх платформ, расположенных в северо-восточной части моря (Таганрог, Очаковская коса, Ейск-порт, Должанская), демонстрируют значительное снижение уровня воды в ноябре 2019 года [6].

Данные с платформы Мысовая, расположенной на мысе Казантип в юго-западной части моря, демонстрируют диаметрально противоположную ситуацию — в ноябре наблюдался существенный подъем уровня воды.

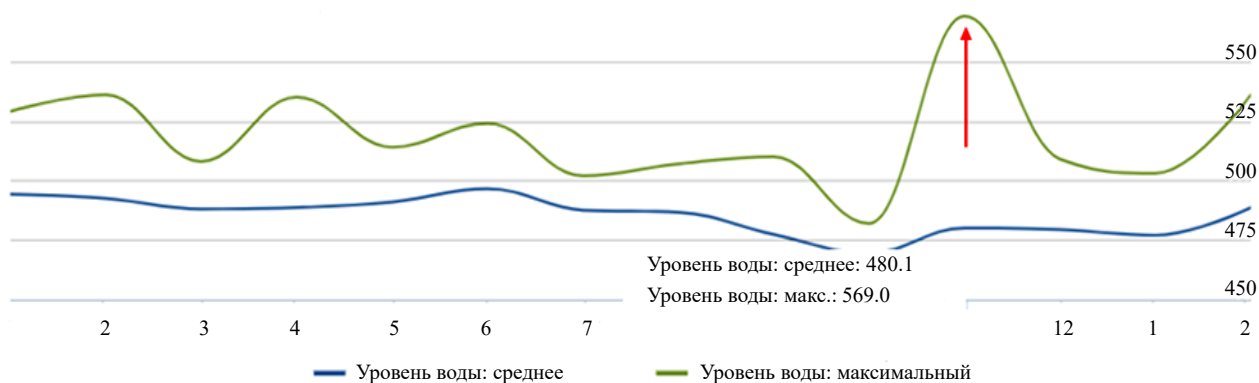


Рис. 4. Климатические данные по гидрометеоусловиям прибрежной зоны Азовского моря: уровень моря на береговых ГМС Мысовая в 2019 году

При этом данные естественно коррелируют со средней и максимальной скоростью ветра, полученной из прибрежного массива среднемесячных значений скорости ветра, которые достигают в ноябре 2019 года максимальных значений.

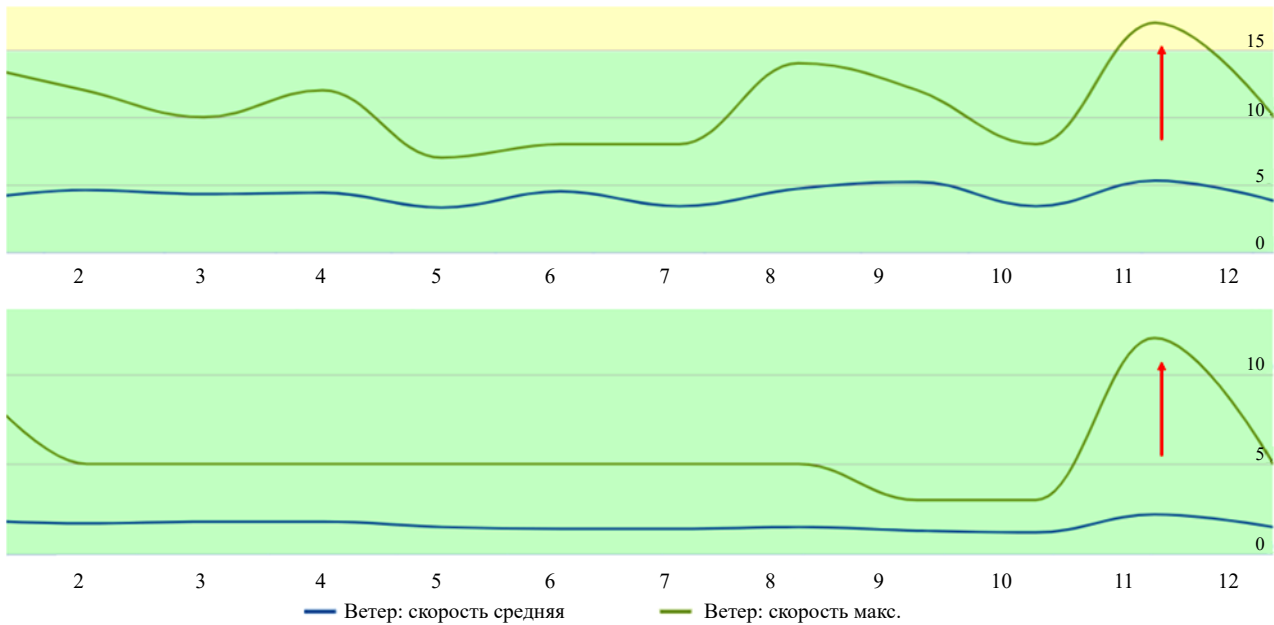


Рис. 5. Средняя и максимальная скорости ветра в 2019 году в северо-восточной части моря (верхний график) и юго-западной частью (нижний график) Азовского моря

2. Постановка задачи. Моделирование сгонно-нагонных процессов основывается на решении системы уравнений волновой гидродинамики мелководного водоема (запись в декартовых координатах x, y, z) [7–8]:

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

$$v'_t + uv'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho} P'_y + (\mu v'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (\mu w'_z)'_z,$$

$$w'_t + uw'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho} P'_z + (\mu w'_x)'_x + (\mu w'_y)'_y + (\mu w'_z)'_z + g,$$

$$\rho'_t + (\rho u)'_x + (\rho v)'_y + (\rho w)'_z = 0. \quad (1)$$

В уравнениях (1), (2) приняты обозначения: $\xi'_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}$ u, v, w — компоненты скорости водного потока мелководного водоема; ρ — плотность водной среды; P — гидродинамическое давление; g — ускорение свободного падения; μ, ν — коэффициенты турбулентного обмена в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Пусть $\tau = \rho_a C_d_s |\mathbf{w}| \mathbf{w}$ — вектор тангенциального напряжения для свободной поверхности, где C_d_s — безразмерный коэффициент поверхностного сопротивления, который зависит от скорости ветра ($C_d_s = 0,0026$), \mathbf{w} — вектор скорости ветра относительно воды, ρ_a — плотность атмосферы. Для дна задан вектор тангенциального напряжения с учетом движения воды $\tau = \rho_a C_d_b |\mathbf{V}| \mathbf{V}$, $C_d_b = g k^2 / h^{1/3}$, k — групповой коэффициент шероховатости ($k = 0,04$), $h = H + \eta$ — глубина акватории, H — глубина до невозмущенной поверхности, η — высота свободной поверхности относительно уровня моря.

Будем использовать аппроксимацию, позволяющую строить неоднородный по глубине коэффициент вертикального турбулентного обмена на основании измеренных пульсаций скоростей водного потока:

$$\nu = C_s^2 \Delta^2 \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2}, \quad (3)$$

где C_s — безразмерная эмпирическая константа, определяемая на основе расчета процесса затухания однородной изотропной турбулентности, Δ — характерный масштаб сетки, \bar{u}, \bar{v} — усредненные по времени пульсации компонент скорости водного потока в горизонтальном направлении.

Для построения дискретной математической модели поставленной задачи гидродинамики и ее численной реализации введем равномерную сетку:

$$\bar{w}_h = \{t^n = n\tau, \quad x_i = ih_x, \quad y_j = jh_y, \quad z_k = kh_z; \quad n = 0, N_t, \quad i = 0, N_x, \quad j = 0, N_y, \quad k = 0, N_z,\}$$

$$N_t \tau = T, \quad N_x h_x = l_x, \quad N_y h_y = l_y, \quad N_z h_z = l_z\},$$

где τ — шаг по времени; h_x, h_y, h_z — шаги по пространству; N_t — количество временных слоев; T — верхняя граница по временной координате; N_x, N_y, N_z — количество узлов по пространственным координатам; l_x, l_y, l_z — длины ребер элементарного параллелепипеда в направлении осей O_x, O_y и O_z соответственно.

Для решения задачи гидродинамики воспользуемся методом поправки к давлению. Вариант метода в случае переменной плотности принимает вид [9–10]:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{u}-u}{\tau} + u\bar{u}'_x + v\bar{u}'_y + w\bar{u}'_z &= (\mu\bar{u}'_x)'_x + (\mu\bar{u}'_y)'_y + (\nu\bar{u}'_z)'_z, \\ \frac{\tilde{v}-v}{\tau} + u\bar{v}'_x + v\bar{v}'_y + w\bar{v}'_z &= (\mu\bar{v}'_x)'_x + (\mu\bar{v}'_y)'_y + (\nu\bar{v}'_z)'_z, \\ \frac{\tilde{w}-w}{\tau} + u\bar{w}'_x + v\bar{w}'_y + w\bar{w}'_z &= (\mu\bar{w}'_x)'_x + (\mu\bar{w}'_y)'_y + (\nu\bar{w}'_z)'_z + g, \\ p''_{xx} + p''_{yy} + p''_{zz} &= \frac{\hat{\rho}-\rho}{\tau^2} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{u})'_x}{\tau} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{v})'_y}{\tau} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{w})'_z}{\tau}, \\ \frac{\hat{u}-\tilde{u}}{\tau} &= -\frac{1}{\rho}\hat{p}'_x, \quad \frac{\hat{v}-\tilde{v}}{\tau} = -\frac{1}{\rho}\hat{p}'_y, \quad \frac{\hat{w}-\tilde{w}}{\tau} = -\frac{1}{\rho}\hat{p}'_z. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь: u, v, w — компоненты вектора скорости $V = \{u, v, w\}$; $\{\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}\}$, $\{\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}\}$ — компоненты полей скорости на «новом» и промежуточном временных слоях соответственно; $\bar{u} = (\tilde{u} + u)/2$; $\hat{\rho}$ и ρ — распределение плотности водной среды на новом и предыдущем временных слоях.

3. Комбинация методов локальных бинарных шаблонов (LBP) и нейронных систем для создания начальных и граничных условий, а также проверки моделирования. При корректной постановке начально-краевых задач для систем нелинейных уравнений с частными производными и определения различных функциональных зависимостей при построении математических моделей необходимо иметь реальные входные данные (граничные, начальные условия, информацию о функциях-источниках). Во время принятия решений, касающихся рисков, связанных с опасными природными явлениями и катастрофами, до 50 % от общего времени, затрачиваемого на компьютерное моделирование и прогнозирование, может занимать процесс распознавания конкретной ситуации. В частности, это относится к определению местоположения и размеров таких явлений, как сгонно-нагонные, заморные явления и др. Доступным источником натурной информации для математического моделирования могут быть данные дистанционного зондирования Земли. Их распознавание и ввод в качестве начальных и граничных условий представляет собой довольно сложную и трудоемкую процедуру, которая требует создания специальных алгоритмов [9–10]. Также распознавание незаменимо и для дальнейшего сравнительного анализа точности работы математического моделирования.

Алгоритм «нейросеть-LBP», подробно описанный в работах [11–13], является отечественным решением в этой проблемной области. Для дальнейшей работы воспользуемся снимками со спутников, сделанными 17 и 22 ноября 2019 года (рис. 6 и 7).

Композиции различных пикселей изображения совместно работают для определения ориентации и масштаба объекта на изображении. Это позволяет распознавать и локализовывать необходимые признаки, не зависимо от того, как повернуто изображение или изменена его яркость/контрастность. Сегментация изображения осуществляется с учетом заранее определенного набора семантических классов, которые кодируются числами от 0 до некоего предела. Эти семантические метки состоят из подмножеств, каждое из которых соответствует конкретной семантической метке. Таким образом, когда пиксель помечается определенным номером семантического класса, его соответствующий идентификатор экземпляра не имеет значения. Это означает, что для классов все пиксели принадлежат к одному экземпляру (например, один и тот же цвет).

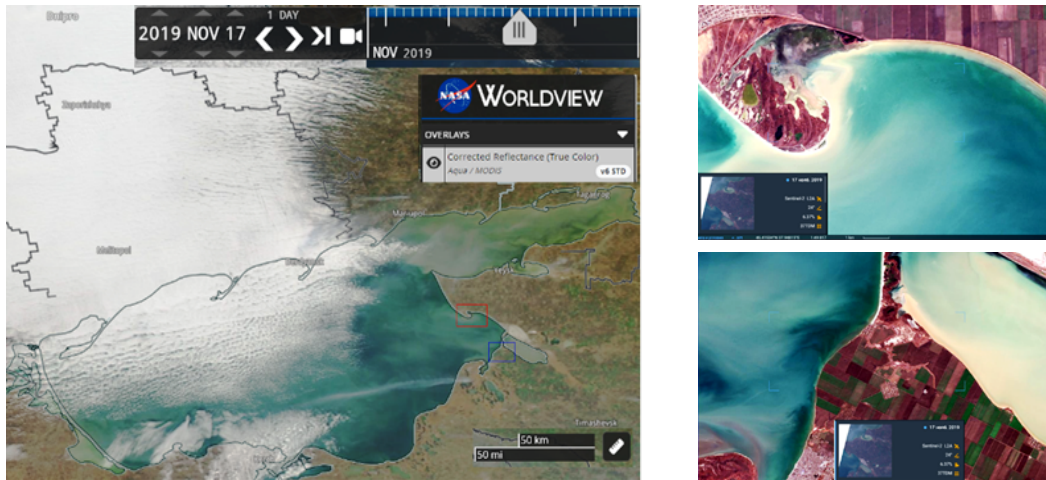


Рис. 6. Снимки области исследования со спутников WorldView [14] и Сентинел-2 L2A [13], дата — 17.11.2019 г.

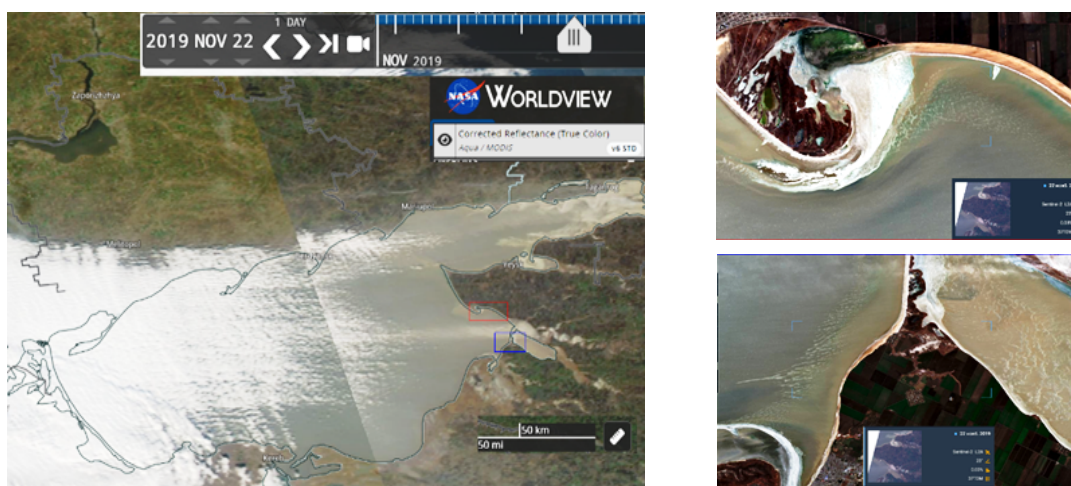


Рис. 7. Снимки области исследования со спутников WorldView [14] и Сентинел-2 L2A [15], дата — 22.11.2019 г.

В процессе работы алгоритма идет сопоставление сегментов и вычисляется PQ с учётом совпадений в два этапа. На первом происходит сопоставление эмпирических данных и прогнозируемых сегментов с порогом SP , равным 0,5. При таком подходе получается уникальное сопоставление, при котором сегменты не пересекаются. Таким образом, максимальное количество совпадений на сегмент будет равно одному. На втором этапе производится вычисление PQ , учитывая предсказанную и наземную истину сегментации изображения. Каждый сегмент наземной истины может иметь не более одного соответствующего прогнозируемого сегмента с SP строго больше, чем 0,5, и наоборот. Это означает, что, если для определённого сегмента наземной истины найден соответствующий прогнозируемый сегмент, он автоматически отнесётся к категории «согласованные пары». Если же ни один из прогнозируемых сегментов не соответствует сегменту наземной истины, то он будет отнесён к категории «несогласованные сегменты истинности». Если для определённого сегмента наземной истины не найдено соответствующего прогнозируемого сегмента, то прогнозируемые сегменты, которые пересекают его, будут отнесены к категории «несогласованные прогнозируемые сегменты». Таким образом, после сопоставления каждый сегмент попадает в один из трёх наборов: согласованные пары (MP), несогласованные прогнозируемые сегменты (UP) и несогласованные сегменты истинности (UT).

$$PQ = \frac{\sum_{(\phi, gg) \in MP} SP(\phi, gg)}{|MP| + \frac{1}{2}|UP| + \frac{1}{2}|UT|}, \quad (5)$$

где ϕ — прогнозируемые сегменты; gg — сегменты наземной истины (окружение объекта); SP — пороговое значение, равное 0,5; MP — согласованные пары; UP — несогласованные прогнозируемые сегменты; UT — несогласованные наземные сегменты истинности.

4. Описание программного комплекса. В данной работе был использован усовершенствованный программный комплекс, учитывающий динамические изменения расчетной области за счет волновых процессов, струйные эффекты и многокомпонентную природу примесей, предназначенный для построения трехмерных полей скоростей движения водной среды с учетом неоднородного по глубине коэффициента вертикального турбулентного обмена и динамического перестроения геометрии расчетной области. Программный комплекс реализован на C++. Алгоритм организации вычислительного эксперимента на основе разработанного программного комплекса представлен на рис. 8.

Комплекс программ позволяет задавать сложную геометрию дна в виде растровой модели, построенной на основе известных данных кадастровых съемок и данных дистанционного зондирования, вида и характеристики источника колебаний, направления и скорости ветра.

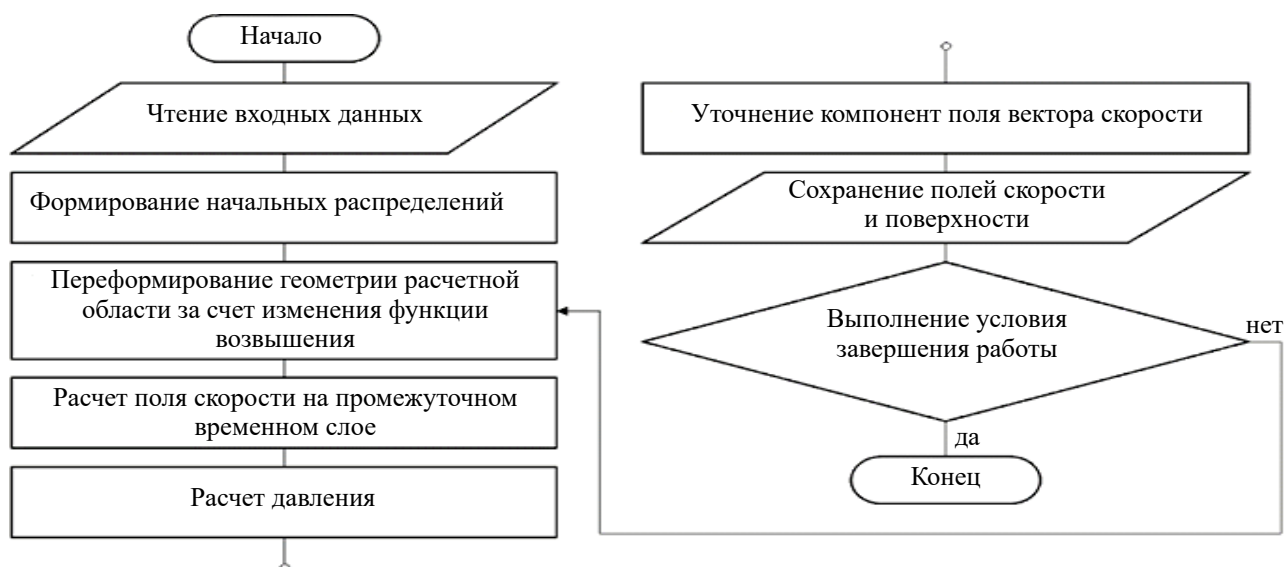


Рис. 8. Схема алгоритма организации вычислительного эксперимента

Результаты исследования

1. Результаты численных экспериментов на основе трехмерной модели волновой гидродинамики. Продолжительное действие ветра со значительными скоростями привело к развитию сгонно-нагонного колебания, при котором в восточной части Азовского моря наблюдался экстремальный сгон, а в западной — нагон.

Уровень моря за период штормовой ситуации в Таганрогском заливе ночью с 21 на 22 ноября 2019 г. опускался ниже 220–240 см относительного среднего уровня. Максимальные нагонные повышения уровня моря наблюдались в прибрежной западной части Азовского моря и достигали до 130–140 см (рис. 9).

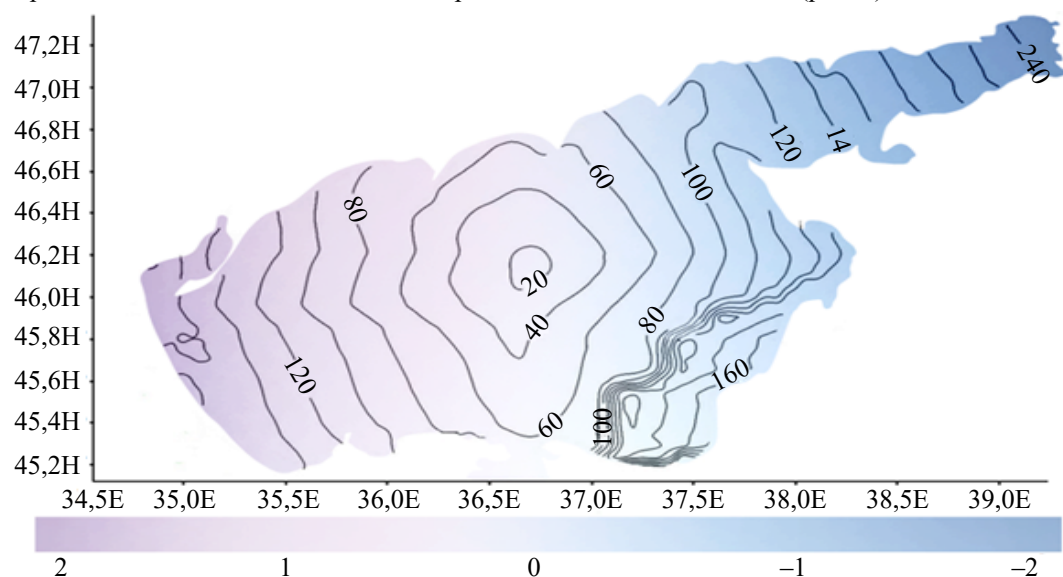


Рис. 9. Уровень моря, отсчитываемый относительно среднего уровня Азовского моря 22 ноября 2019 года

Для моделирования был выбран участок Таганрогского залива размерами 100 на 50 метров, максимальная глубина на данном участке составила 1,8 метра. При расчетах использовалась сетка $100 \times 200 \times 40$ расчетных узлов, шаг по времени составил 0,01 секунды. При моделировании скорость ветра задавалась равной 15 м/с, направление восточное (рис. 10 и 11).

Согласно данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 22 ноября 2019 г. на Азовском море наблюдался северо-восточный ветер скоростью 12–17 м/с, порывы до 27 м/с, высота волн 1,3–1,8 м. Днем 22, ночью и утром 23 ноября на Азовском море наблюдался северо-восточный ветер скоростью 11–16 м/с, порывы 22 м/с, высота волн 1–2 м. Результаты моделирования согласуются с данными Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. При установившемся волнении расчетные высоты волн составили 1,6–2 метра.

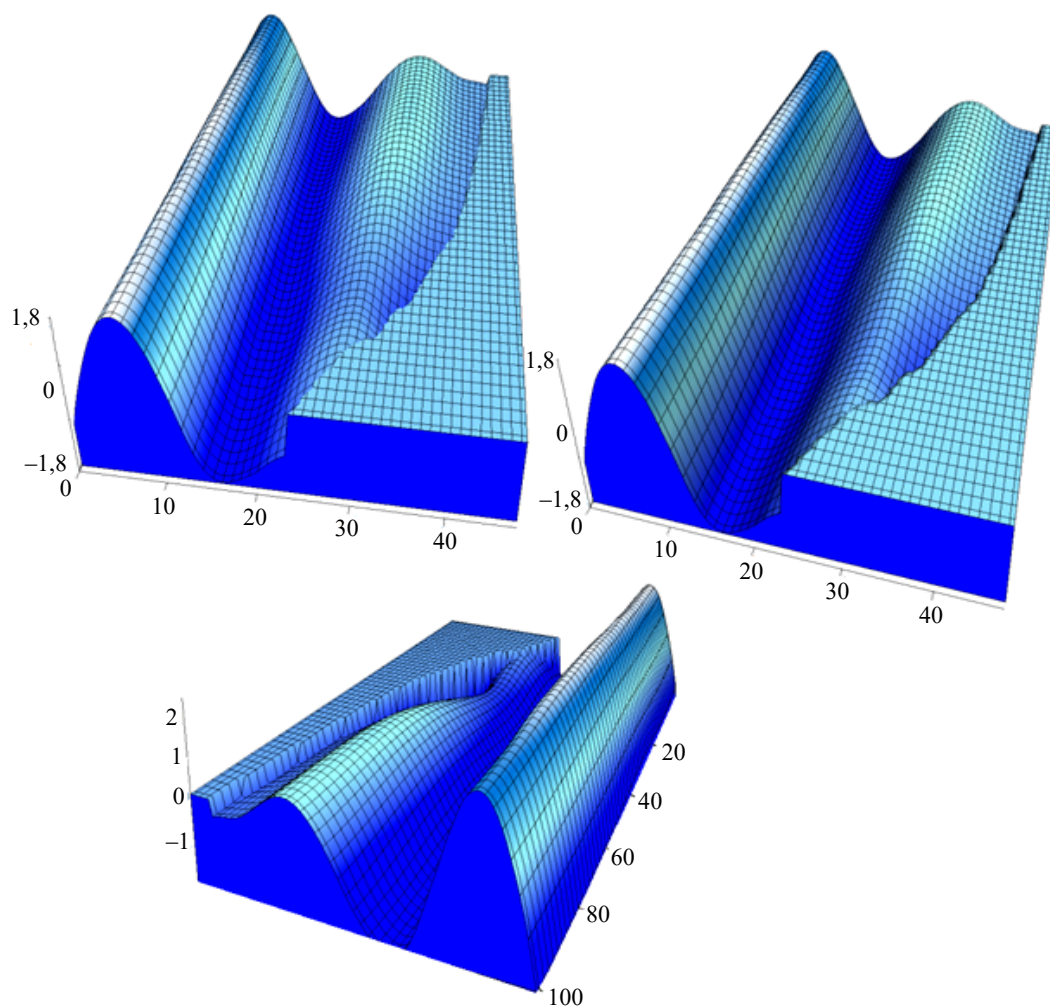


Рис. 10. Результаты моделирования высот волн при восточном ветре со скоростью 15 м/с

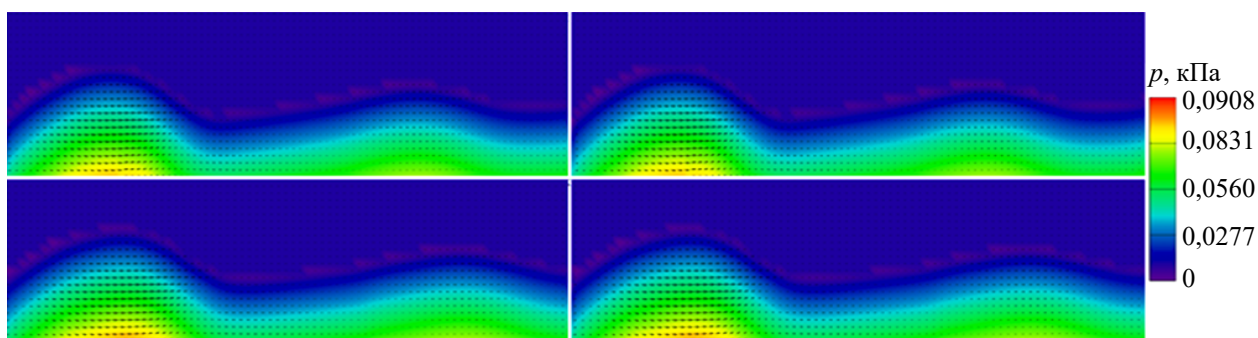


Рис. 11. Результаты моделирования поля вектора скорости и давления при восточном ветре со скоростью 15 м/с

2. Результаты численных экспериментов на основе алгоритма «нейросеть-LBP» для обработки граничных контуров водной среды на основе ДДЗ. Результаты работы программного модуля позволяют отслеживать динамику контуров (в нашем случае береговой линии) на протяжении длительного периода времени (рис. 12 и 13).

В рамках численных экспериментов был проведен анализ снимков области исследования (станция Ясенская и хутор Морозовский) за 17 и 22 ноября 2019 года. Результаты показали, что алгоритм «нейросеть-LBP» успешно идентифицирует и отслеживает изменения в береговой линии на протяжении рассматриваемого периода. На рис. 12 и 13 представлены соответствующие снимки, демонстрирующие динамику изменения береговой линии за указанный период времени.

Результаты численных экспериментов показывают высокую эффективность алгоритма «нейросеть-LBP» для обработки граничных контуров водной среды. Алгоритм позволяет автоматически распознавать и вводить данные дистанционного зондирования в модель, что значительно ускоряет процесс моделирования и повышает его точность. В частности, использование данных спутниковых снимков за 17 и 22 ноября 2019 года продемонстриро-

вало способность модели точно прогнозировать уровни преобладающих волн, среднюю длину и период ветровых волн в Азовском море на различные временные горизонты (начальный момент времени, через 3, 6 и 9 часов).

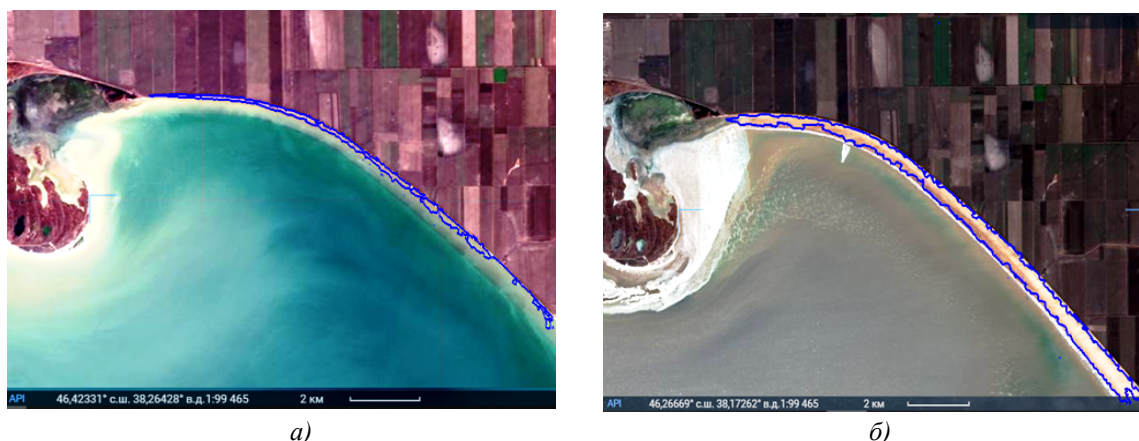


Рис. 12. Снимки области исследования — Станица Ясенская:
а — 17.11.2019 г.; б — 22.11.2019 г.

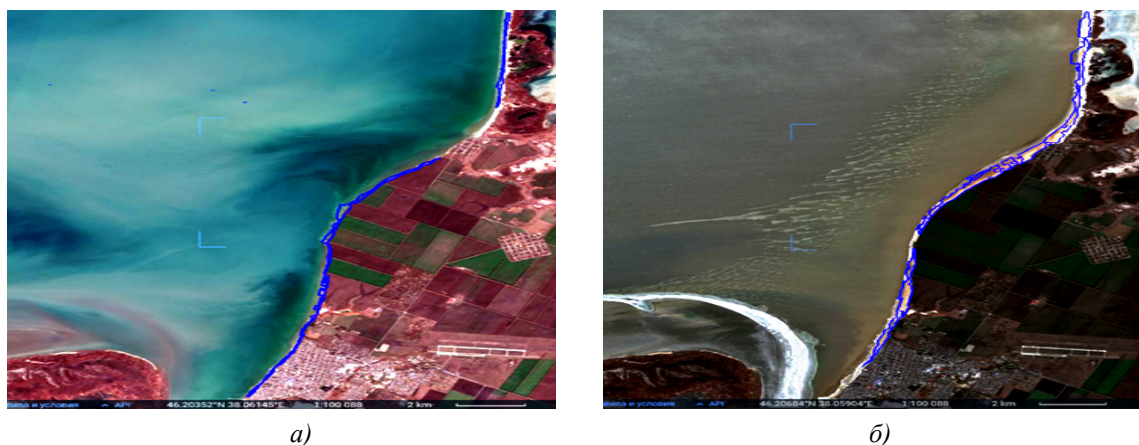


Рис. 13. Снимки области исследования — Хутор Морозовский:
а — 17.11.2019 г.; б — 22.11.2019 г.

Обсуждение и заключения. Моделирование сгонно-нагонных процессов в Азовском море базируется на решении системы уравнений волновой гидродинамики мелководного водоема, что позволяет учитывать сложные динамические процессы, влияющие на уровень моря и ветровое волнение. В данной работе используется метод локальных бинарных шаблонов (LBP) в комбинации с нейронными сетями для обработки граничных контуров водной среды. Этот подход позволяет более точно моделировать и прогнозировать экстренные колебания уровня моря, что особенно важно для мелководных водоемов (таких, как Азовское море), где такие явления могут иметь значительные экономические и экологические последствия. Полученные результаты подтверждают важность и необходимость дальнейших исследований в области гидродинамического моделирования и использования современных методов обработки данных для улучшения прогнозов природных явлений, связанных с изменениями уровня моря и ветровым волнением.

Список литературы

1. Alekseenko E., Roux B., Sukhinov A., Kotarba R., Fougere D. Coastal hydrodynamics in a windy lagoon. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2013;20(2):189–198. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.02.003>
2. Holthuijsen L.H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. 2007. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
3. Kirby J.T. (2013). *Advanced Numerical Models for Simulating Tsunami Waves and Runup*. World Scientific Publishing Company. <https://doi.org/10.1142/9101>
4. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628955>
5. Mei C.C., Stiassnie M., Yue D.K.P. *Theory and Applications of Ocean Surface Waves: Linear Aspects*. World Scientific Publishing Company. 2005. <https://doi.org/10.1142/5678>

6. The official website of the Unified State Information System on the Situation in the World Ocean. URL: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения: 11.06.2024)
7. Protsenko S., Sukhinova T. Mathematical modeling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures. *MATEC Web of Conferences*. 2017;132(2):04002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204002>
8. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Mathematical Modeling of Sediment Transport in the Coastal Zone of Shallow Reservoirs. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014;6(4):351–363. <https://doi.org/10.1134/S2070048214040097>
9. Panasenkov N.D. Forecasting the Coastal Systems State using Mathematical Modelling Based on Satellite Images. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;7(4):54–65. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-4-54-65>
10. Sukhinov A.I., Protsenko S.V., Panasenkov N.D. Mathematical modeling and ecological design of the marine systems taking into account multi-scale turbulence using remote sensing data. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2022;6(3):104–113. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2022-1-3-104-113>
11. Sukhinov A., Panasenkov N., Simorin A. Algorithms and programs based on neural networks and local binary patterns approaches for monitoring plankton populations in sea systems. *E3S Web of Conferences*. 2022;363:02027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236302027>
12. Xu W., Yin X., Zhang W. A Review of Applications of Neural Networks in Coastal and Ocean Engineering. *Ocean Engineering*. 2019;186:106092. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106092>
13. Zhang L., Wang L., Yang Z. Deep Learning for Remote Sensing Image Analysis: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018;11(10):3713–3723. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2857630>
14. The official website of Earth observing system. URL: <https://eos.com/landviewer/account/pricing> (дата обращения: 12.06.2024)
15. The official website of NASA Worldview. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 12.06.2024)

References

1. Alekseenko E., Roux B., Sukhinov A., Kotarba R., Fougere D. Coastal hydrodynamics in a windy lagoon. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2013;20(2):189–198. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.02.003>
2. Holthuijsen L.H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. 2007. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
3. Kirby J.T. (2013). *Advanced Numerical Models for Simulating Tsunami Waves and Runup*. World Scientific Publishing Company. <https://doi.org/10.1142/9101>
4. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628955>
5. Mei C.C., Stiassnie M., Yue D.K.P. *Theory and Applications of Ocean Surface Waves: Linear Aspects*. World Scientific Publishing Company. 2005. <https://doi.org/10.1142/5678>
6. The official website of the Unified State Information System on the Situation in the World Ocean. URL: <http://esimo.ru/portal/> (accessed: 11.06.2024)
7. Protsenko S., Sukhinova T. Mathematical modeling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures. *MATEC Web of Conferences*. 2017;132(2):04002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204002>
8. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Mathematical Modeling of Sediment Transport in the Coastal Zone of Shallow Reservoirs. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014;6(4):351–363. <https://doi.org/10.1134/S2070048214040097>
9. Panasenkov N.D. Forecasting the Coastal Systems State using Mathematical Modelling Based on Satellite Images. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;7(4):54–65. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-4-54-65>
10. Sukhinov A.I., Protsenko S.V., Panasenkov N.D. Mathematical modeling and ecological design of the marine systems taking into account multi-scale turbulence using remote sensing data. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2022;6(3):104–113. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2022-1-3-104-113>
11. Sukhinov A., Panasenkov N., Simorin A. Algorithms and programs based on neural networks and local binary patterns approaches for monitoring plankton populations in sea systems. *E3S Web of Conferences*. 2022;363:02027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236302027>
12. Xu W., Yin X., Zhang W. A Review of Applications of Neural Networks in Coastal and Ocean Engineering. *Ocean Engineering*. 2019;186:106092. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106092>
13. Zhang L., Wang L., Yang Z. Deep Learning for Remote Sensing Image Analysis: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018;11(10):3713–3723. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2857630>

14. The official website of Earth observing system. URL: <https://eos.com/landviewer/account/pricing> (accessed: 12.06.2024)

15. The official website of NASA Worldview. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (accessed: 12.06.2024)

Поступила в редакцию 06.06.2024

Поступила после рецензирования 20.06.2024

Принята к публикации 21.06.2024

Об авторах:

Проценко Елена Анатольевна, доцент кафедры математики, ведущий научный сотрудник, Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (347936, РФ, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48), кандидат физико-математических наук, [ORCID](#), eapros@rambler.ru

Панасенко Наталья Дмитриевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры вычислительных систем и информационной безопасности Донской государственной технической университет (РФ, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [AutorID](#), natalija93_93@mail.ru

Проценко Софья Владимировна, доцент кафедры математики, научный сотрудник, Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (347936, РФ, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48), кандидат физико-математических наук, [ORCID](#), rab5555@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 06.06.2024

Revised 20.06.2024

Accepted 21.06.2024

About the Authors:

Elena A. Protsenko, Associate Professor of the Department of Mathematics, Leading Researcher, A.P. Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics (48, Initiative St., Taganrog, 347936, RF), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, [ORCID](#), eapros@rambler.ru

Natalya D. Panasenko, PhD (Technical Sciences), Senior Lecturer of the Department of Computer Systems and Information Security, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [AutorID](#), natalija93_93@mail.ru

Sofia V. Protsenko, Associate Professor of the Department of Mathematics, Researcher, A.P. Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics (48, Initiative St., Taganrog, 347936, RF), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, [ORCID](#), rab5555@rambler.ru

Claimed contributor-ship:

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.