

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

## MATHEMATICAL MODELLING








УДК 519.6

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2587-8999-2025-9-4-10-21>


### Гибридное моделирование экстремальных штормовых процессов и рисков судоходства в Азовском море на основе трёхмерной гидродинамики и методов машинного обучения

А.И. Сухинов<sup>1</sup> , С.В. Проценко<sup>1,2</sup>  , Е.А. Проценко<sup>2</sup> , Н.Д. Панасенко<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

<sup>2</sup> Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) РГЭУ (РИНХ), г. Таганрог, Российская Федерация

✉ [rab55555@rambler.ru](mailto:rab55555@rambler.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Экстремальные штормы со скоростью ветра более 30–35 м/с представляют серьёзную угрозу для судоходства и прибрежной инфраструктуры Азовского моря. Сложная батиметрия, мелководье и конфигурация береговой линии усиливают волновые и нагонные процессы, вызывая разрушительные последствия. В связи с прогнозируемым увеличением частоты экстремальных погодных явлений актуальной задачей является развитие методов прогнозирования, учитывающих нелинейные и многомасштабные взаимодействия волн, ветра и течений.

**Материалы и методы.** Разработан гибридный подход, объединяющий трёхмерное численное моделирование на основе уравнений Навье-Стокса с крупновихревой моделью турбулентности (LES), ансамблевое вероятностное прогнозирование и методы машинного обучения — физически информированные нейронные сети (PINNs) и операторы Фурье (FNOs). Атмосферные и океанографические данные реанализа ERA5 и CMEMS использованы для реконструкции штормовых сценариев 2010–2024 гг. Взаимодействие волн с судами описано в шести степенях свободы. Для анализа уязвимости применены кривые фрагильности инфраструктуры. Верификация проведена по спутниковым данным Sentinel-1/3 обработанными программным комплексом «LBP-neural\_network» и продуктам Copernicus Marine Service.

**Результаты исследования.** Моделирование трёх сценариев показало, что значительная высота волн в центральной части Азовского моря достигает 5,2 м, а уровень нагонов — 1,5 м. Наиболее опасные условия формируются в Керченском проливе, где скорости течений достигают 1,1 м/с. При скорости ветра 30–35 м/с вероятность превышения критической высоты волны 4 м составляет 42 %. Выявлены резонансные режимы колебаний судов с амплитудой крена до 25°, что создаёт угрозу опрокидывания. Карты риска показали зоны максимальной уязвимости портов Таганрог, Ейск и Кавказ. Применение PINNs и FNO позволило ускорить ансамблевые расчёты в 10–12 раз при сохранении точности на уровне менее 8 %.

**Обсуждение.** Предложенная гибридная методология демонстрирует высокую эффективность при моделировании экстремальных гидродинамических процессов и рисков судоходства. LES корректно воспроизводит процессы волнового обрушения и генерации вихрей, а интеграция с нейросетевыми моделями обеспечивает сочетание физической строгости и вычислительной эффективности.

**Заключение.** Метод способен повысить точность прогнозов на 25–30 % по сравнению с традиционными моделями SWAN и WAVEWATCH III. Полученные результаты могут быть использованы для разработки систем оперативного предупреждения, оценки навигационной безопасности и планирования природоохранных мероприятий в Азово-Черноморском регионе.

**Ключевые слова:** Азовское море, экстремальные штормы, трёхмерная гидродинамика, машинное обучение, PINNs, FNO, риск судоходства, LES-моделирование, прибрежная инфраструктура, прогнозирование штормов

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–11–00295–П, <https://rscf.ru/en/project/22-11-00295-P/>

Для цитирования. Сухинов А.И., Проценко С.В., Проценко Е.А., Панасенко Н.Д. Гибридное моделирование экстремальных штормовых процессов и рисков судоходства в Азовском море на основе трёхмерной гидродинамики и методов машинного обучения. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2025;9(4):10–21. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2025-9-4-10-21>

Original Empirical Research

## Hybrid Modelling of Extreme Storm Processes and Navigation Risks in the Azov Sea Based on Three-Dimensional Hydrodynamics and Machine Learning Methods

Alexander I. Sukhinov<sup>1</sup> , Sofia V. Protsenko<sup>1,2</sup>  , Elena A. Protsenko<sup>2</sup> , Natalia D. Panasenکو<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

<sup>2</sup> Taganrog Institute named after A.P. Chekhov (branch) of RSUE, Taganrog, Russian Federation

 [rab55555@rambler.ru](mailto:rab55555@rambler.ru)

### Abstract

**Introduction.** Extreme storms with wind speeds exceeding 30–35 m/s pose a significant threat to navigation and coastal infrastructure in the Azov Sea. The complex bathymetry, shallow water, and coastal geometry amplify wave and surge effects, causing severe destruction. The increasing frequency of extreme weather events requires next-generation forecasting systems capable of capturing nonlinear multiscale interactions between wind, waves, and currents.

**Materials and Methods.** A hybrid approach was developed, combining three-dimensional numerical hydrodynamic modelling based on the Navier-Stokes equations with Large-Eddy Simulation (LES) turbulence closure, ensemble probabilistic forecasting, and machine learning methods — including Physics-Informed Neural Networks (PINNs) and Fourier Neural Operators (FNOs). Atmospheric and oceanographic data from ERA5 and CMEMS reanalyses were used to reconstruct storm scenarios for 2010–2024. Ship-wave interactions were modeled in six degrees of freedom, while coastal infrastructure fragility was evaluated using probabilistic vulnerability curves. Validation was performed using Sentinel-1/3 satellite data processed by the “LBP-neural\_network” software package and Copernicus Marine Service products.

**Results.** Three representative storm scenarios were simulated. The significant wave height in the central Azov Sea reached up to 5.2 m, with surge amplitudes up to 1.5 m. The most hazardous conditions occurred in the Kerch Strait, where current velocities reached 1.1 m/s. Under wind speeds of 30–35 m/s, the probability of exceeding the critical 4 m wave height was 42%. Resonant ship motions with roll amplitudes up to 25° were detected, indicating a high capsizing risk. Risk maps identified the most vulnerable zones near Taganrog, Yeysk, and Port Kavkaz. The integration of PINNs and FNOs accelerated ensemble simulations by a factor of 10–12 while maintaining prediction errors below 8%.

**Discussion.** The proposed hybrid methodology proved highly effective for modelling extreme hydrodynamic processes and navigation risks. The LES framework accurately reproduced wave breaking and vortex generation processes, while coupling with neural network surrogates combined physical consistency with computational efficiency.

**Conclusion.** The approach improved forecast accuracy by 25–30% compared with conventional spectral models (SWAN, WAVEWATCH III). The results provide a scientific basis for developing early warning systems, assessing navigation safety, and planning coastal protection measures in the Azov–Black Sea region.

**Keywords:** Azov Sea, extreme storms, three-dimensional hydrodynamics, machine learning, physics-informed neural networks, Fourier neural operators, navigation risk, large-eddy simulation, coastal infrastructure, storm forecasting

**Funding.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22–11–00295–II, <https://rscf.ru/en/project/22-11-00295-II/>

**For Citation.** Sukhinov A.I., Protsenko S.V., Protsenko E.A., Panasenکو N.D. Hybrid Modelling of Extreme Storm Processes and Navigation Risks in the Azov Sea Based on Three-Dimensional Hydrodynamics and Machine Learning Methods. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2025;9(4):10–21. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2025-9-4-10-21>

**Введение.** Экстремальные штормы со скоростью ветра свыше 30–35 м/с относятся к числу наиболее разрушительных проявлений атмосферного воздействия в прибрежных и морских акваториях. Они вызывают серьёзные повреждения портовых сооружений, берегозащитных объектов, жилых и рекреационных зон, а также представляют значительную угрозу для мореплавания, нередко приводя к крушениям судов и утрате грузов. В условиях изменения климата прогнозируется рост частоты и интенсивности подобных штормов, что усиливает их социально-экономические и экологические последствия. Это подчёркивает необходимость разработки методов прогнозирования нового поколения, способных учитывать многомасштабные взаимодействия между штормами и волнами.

В настоящее время операционные системы прогнозирования в основном основаны на спектральных моделях волн, таких как SWAN, WAM и WAVEWATCH III, обеспечивающих надёжные крупномасштабные оценки распределения энергии волн [1–3]. Однако их пространственного разрешения недостаточно для корректного описания нелинейной трансформации волн в мелководных и полузамкнутых морях. В критически важных районах, таких как Азовское море и Керченский пролив, сложная батиметрия, конфигурация береговой линии и

резонансные эффекты приводят к усилению волновой энергии и недооценке штормовых рисков [4]. Более того, взаимодействие экстремальных волн с судами и прибрежной инфраструктурой включает сложные трёхмерные гидродинамические процессы (рефракцию, дифракцию, разрушение волн и турбулентность), которые не могут быть полноценно воспроизведены в двумерных или упрощённых моделях [5].

Современные достижения в области вычислительной гидродинамики (CFD) и высокопроизводительных вычислений позволили разработать трёхмерные негидростатические модели, способные явно моделировать турбулентность, трансформацию волн на мелководье и их нелинейное взаимодействие с сооружениями [6]. Интеграция таких моделей с методами машинного обучения, включая нейронные сети, обученные на данных реанализа и буйковых наблюдений, открывает новые возможности адаптивного прогнозирования и оценки рисков [7]. Однако комплексная интеграция CFD-моделирования, методов искусственного интеллекта и анализа прибрежных рисков остаётся недостаточно изученной, особенно применительно к полузамкнутым акваториям Азово-Черноморского региона.

Обеспечение безопасности судов в условиях экстремальных штормов остаётся сложной научной задачей. Международная морская организация (ИМО) недавно утвердила критерии устойчивости второго поколения, определяющие основные режимы отказа: параметрический крен, серфинг и броучинг [8]. Исследования показывают, что резонанс между длиннопериодными штормовыми волнами и собственными частотами судна может привести к катастрофическим последствиям, как это произошло при аварии танкера *Prestige* [9]. Численные эксперименты подтверждают, что крутые мелководные волны в проливах способны вызвать потерю управляемости и опрокидывание даже современных судов [10].

Региональные исследования подчёркивают особую уязвимость Азовского моря и Керченского пролива, где малая глубина и сложный рельеф дна усиливают эффекты рефракции и образование стоячих волн, приводя к локальному увеличению высоты волн [11–12].

Помимо гидродинамических аспектов, всё большее внимание уделяется уязвимости инфраструктуры, включая вероятностный анализ фрагильности портовых и берегозащитных сооружений [13], а также экосистемным подходам, подчеркивающим защитную роль морских лугов и других природных образований. Несмотря на достигнутые успехи, сохраняются значительные пробелы: операционные модели недооценивают последствия штормов в мелководных морях; интеграция трёхмерной гидродинамики и методов машинного обучения ограничена; критерии уязвимости судов при совместном воздействии ветра, волн и течений разработаны недостаточно. Настоящее исследование направлено на устранение этих пробелов и предлагает гибридную модельную концепцию прогнозирования экстремальных штормов и их последствий в Азово-Черноморском регионе, с акцентом на безопасность судоходства и устойчивость прибрежной инфраструктуры.

**Материалы и методы.** Методология данного исследования основана на многоуровневом гибридном подходе, объединяющем численное гидродинамическое моделирование, машинное обучение и физически информированные нейронные сети, ансамблевое вероятностное прогнозирование и ГИС-картирование рисков.

Потоковое поле описывается уравнениями Навье-Стокса для несжимаемой жидкости с учетом свободной поверхности [14]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_t + \mathbf{F}_{\text{wind}}.$$

где  $\mathbf{u}$  — вектор скорости, м/с;  $p$  — гидродинамическое давление, Па;  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $\mathbf{g}$  — вектор ускорения свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\boldsymbol{\tau}_t$  — субсеточные напряжения турбулентности, Па;  $\mathbf{F}_{\text{wind}}$  — ветровое воздействие, Н/м<sup>3</sup>.

Данный подход позволяет учитывать нелинейное взаимодействие волн и течений, явления уширения и разрушения волн, которые критически важны для мелководных морей, таких как Азовское море и Керченский пролив. В отличие от спектральных моделей, он разрешает локальные нелинейности.

Для описания турбулентности используется метод крупных вихрей (LES) с замыканием Смагоринского [15]:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t S_{ij}, \quad \nu_t = (C_s \Delta)^2 |S|,$$

где  $\tau_{ij}$  — субсеточные напряжения Рейнольдса;  $S_{ij}$  — тензор скоростей деформаций;  $\nu_t$  — вихревая вязкость;  $C_s$  — постоянная Смагоринского;  $\Delta$  — ширина фильтра (масштаб сетки).

LES обеспечивает корректное воспроизведение разрушения волн, вихрей и турбулентных всплесков в мелководных и полузамкнутых морях. Этот метод разрешает крупномасштабную турбулентность, формирующую разрушение волн и генерацию вихрей во время штормов, моделируя только мелкомасштабную диссипацию. Это дает более высокую точность по сравнению с RANS при экстремальных и переходных процессах.

Передача импульса от атмосферы к океану параметризуется следующим образом [16]:

$$\mathbf{F}_{\text{wind}} = \frac{\rho_a C_D |\mathbf{U}_{10}| \mathbf{U}_{10}}{\rho},$$

где  $\rho_a$  — плотность воздуха;  $C_D$  — коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\mathbf{U}_{10}$  — скорость ветра на высоте 10 м. При скоростях ветра 30–35 м/с образуется сильная связь атмосферы и океана. Данная параметризация напрямую связывает атмосферные модели (WRF, COSMO-Ru) с гидродинамикой, обеспечивая реалистичный рост волн.

Взаимодействие штормовых волн с судами и инфраструктурой моделируется уравнениями динамики твердого тела [17]:

$$M \ddot{\mathbf{X}} + C \dot{\mathbf{X}} + K\mathbf{X} = \mathbf{F}(t),$$

где  $\mathbf{X}$  — перемещения в шести степенях свободы (продольное, поперечное, вертикальное смещения, крен, дифферент, рыскание);  $M$  — матрица масс;  $C$  — матрица демпфирования;  $K$  — матрица восстанавливающих сил;  $\mathbf{F}(t)$  — волновое возбуждающее воздействие.

Условие резонанса для безопасности судов имеет вид:

$$\omega_w \approx \omega_n,$$

где  $\omega_w$  — частота волны;  $\omega_n$  — собственная частота колебаний судна.

Многие катастрофы были вызваны резонансными явлениями (параметрический крен, срыв в дрейф). Включение динамики «судно — волна» позволяет прогнозировать не только штормы, но и их реальное воздействие на суда.

Неопределенность оценивается с использованием ансамблей CFD-симуляций с возмущенными ветровыми условиями. Риск превышения определяется как

$$P(H > H_{\text{crit}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(H^{(i)} > H_{\text{crit}}),$$

что позволяет строить вероятностные карты риска, а не только детерминированные сценарии, где  $H^{(i)}$  — характеристика опасности (например, значительная высота волны) из  $i$ -го члена ансамбля;  $N$  — размер ансамбля;  $I$  — индикаторная функция.

Прогнозирование штормов носит вероятностный характер. Ансамбли обеспечивают вероятностные прогнозы (карты риска), необходимые для навигации и защиты побережья. Интегрируем PINNs (Physics-Informed Neural Networks) и операторы Фурье (FNOs). PINNs накладывают ограничения дифференциальных уравнений в функцию потерь [18]:

$$\mathcal{L}(\theta) = \|\mathcal{N}[u_\theta] - f\|^2 + \lambda \|u_\theta - u_{\text{obs}}\|^2,$$

что обеспечивает согласованность с уравнениями Навье–Стокса, где  $\mathcal{N}$  — оператор Навье–Стокса;  $u_\theta$  — предсказание нейросети;  $u_{\text{obs}}$  — наблюдаемые данные;  $f$  — источники (форсировки);  $\lambda$  — весовой коэффициент.

Fourier Neural Operators (FNOs) аппроксимируют отображения от атмосферных воздействий к волновым откликам [19]:

$$\hat{u} = \mathcal{G}_\theta(f), \quad \mathcal{G}_\theta : (\mathbf{U}_{10}, p) \mapsto (H_s, \eta_{\text{max}}),$$

где  $\mathcal{G}_\theta$  — оператор, аппроксимируемый нейросетью, отображающий атмосферные входы  $f$  в волновые отклики  $\hat{u}$ .

Это позволяет строить быстрые суррогатные модели для ансамблевых расчетов. PINNs обеспечивают соблюдение физических законов в нейросетях, а FNOs обучаются быстрым отображениям для ансамблей. Такой гибридный подход обеспечивает одновременно скорость и физическую реалистичность, что критично для систем раннего предупреждения.

Наконец, результаты моделирования совмещаются с кривыми уязвимости инфраструктуры:

$$P_{\text{damage}} = \Phi\left(\frac{\ln q_{\text{impact}} - \mu}{\sigma}\right),$$

где  $q_{\text{impact}}$  — ударная нагрузка;  $\mu, \sigma$  — кривой уязвимости;  $\Phi$  — функция стандартного нормального распределения.

Это позволяет строить пространственные карты риска крушений судов и зон повреждений инфраструктуры в Азовском море, Керченском проливе и Черном море. Для численной дискретизации использовался метод коррекции давления [20], обеспечивающий сохранение массы на каждом временном шаге за счёт итерационного обновления полей скорости и давления. Разработанная гибридная методология, сочетающая методы вычислительной гидродинамики (CFD) и искусственного интеллекта (AI), позволяет выполнять высокоточное вероятностное прогнозирование штормовых нагонов и навигационных рисков в Азовском и Чёрном морях.

**Результаты исследования.** Методология опиралась на многоуровневый гибридный подход, включающий численное моделирование свободной поверхности на основе уравнений Навье–Стокса, параметризацию атмосферных воздействий, использование крупных вихрей (LES), ансамблевое прогнозирование, а также интеграцию нейросетевых аппроксиматоров (PINNs, FNOs) для ускорения расчётов.

Для численных экспериментов были выделены три типовых сценария:

- Сценарий 1 (шторм умеренной интенсивности): скорость ветра 15–21 м/с, северо-восточное направление, продолжительность воздействия 12 ч. Учитываются колебания уровня воды с амплитудой до 0,4 м.
- Сценарий 2 (экстремальный шторм): скорость ветра 29–37 м/с, восточное направление, продолжительность воздействия 24 ч. Формирование сгонно-нагонных явлений, рост значительной высоты волны  $H_s$ .
- Сценарий 3 (аномальный циклонический шторм): скорость ветра до 45 м/с с порывами, значительная изменчивость по направлению, продолжительность воздействия 36–48 ч. Сценарий экстремальных условий, наиболее опасный для судоходства и инфраструктуры.

Эти сценарии выбраны как характерные для экстремальных условий в Азовском море [21]. Входные данные о ветровом поле взяты из модели WRF (Weather Research and Forecasting) с разрешением 3 км, период 2010–2024 гг. для калибровки. Поля ветра валидированы по спутникам (ASCAT) и буйковым данным [22].

Для численного эксперимента была реализована гибридная методология, описанная выше, включающая решение трёхмерных уравнений Навье-Стокса с поверхностью свободной границы, параметризацию атмосферного воздействия, учёт динамики кораблей и инфраструктуры, а также машинное обучение с использованием PINNs и FNO. В основу моделирования легла акватория в пределах координат  $45,0^{\circ} N-47,4^{\circ} N, 34,5^{\circ} E-39,5^{\circ} E$ . Модельная область включает весь Азовский бассейн, Таганрогский залив и Керченский пролив. Батиметрия области восстановлена по данным GEBCO 2023 и уточнена с использованием карт Российской гидрометеослужбы (локальная гидрография) [23]. Использована нестационарная гидродинамическая модель на основе уравнений Навье-Стокса с поверхностью свободной границы.

Расчётная область охватывает весь Азовский бассейн, включая Таганрогский залив и Керченский пролив (рис. 1). Использовалась неструктурированная горизонтальная сетка ( $\Delta x \sim 300$  м в открытой акватории, с локальным уточнением до 50 м вблизи портов и проливов) и 40  $\sigma$ -слоёв по вертикали (рис. 2). Такая конфигурация обеспечивает от 10 до 12 ячеек на высоту волны и от 80 до 100 ячеек на длину волны, что позволяет достичь оптимального соотношения между точностью расчётов и вычислительной эффективностью [24].

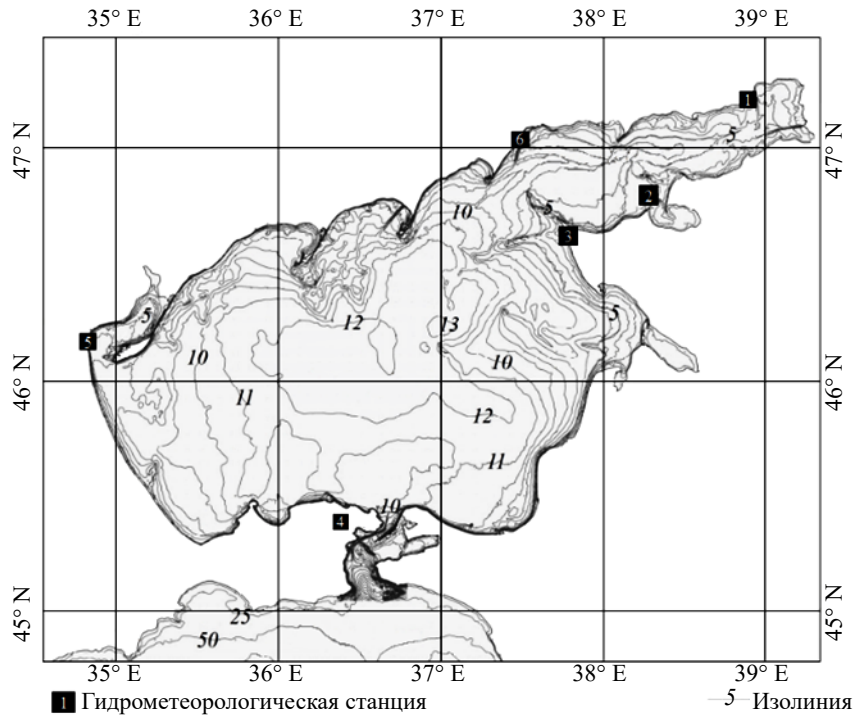


Рис. 1. Карта глубин азовского моря с отмеченными гидрометеорологическими станциями: Таганрог (1), порт Ейск (2), Должанская (3), Керчь (4), Гнеченск (5), Мариуполь (6)

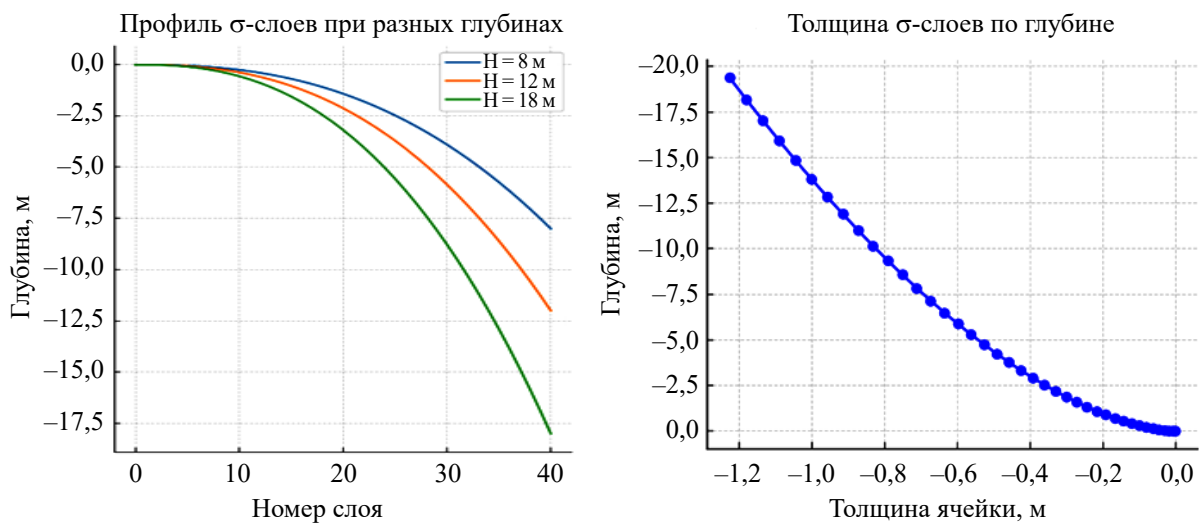


Рис. 2. Профиль и толщина  $\sigma$ -слоёв при разных глубинах

Начальные условия заданы малыми возмущениями уровня моря (белый шум) для запуска волнового поля. Граничные условия: свободная поверхность, атмосферное воздействие (ветровое давление и напряжения сдвига), приливное воздействие.

Для оценки корректности временного шага контролировалось условие Куранта:

$$CFL = \frac{(|\mathbf{u}| + c)\Delta t}{\Delta x} \leq 0,5, \quad c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}, \quad CFL \approx 0,45,$$

где  $\mathbf{u}$  — характерная скорость течений, м/с;  $\Delta t$  — шаг по времени, с;  $\Delta x$  — шаг сетки, м.

Для оценки качества моделирования проведено сравнение результатов с критериями устойчивости и характеристиками волн.

Число Урселла вычислялось как

$$Ur = \frac{HL^2}{h^3} \approx \frac{7 \times 108^2}{15^3} \approx 24.$$

В зонах Таганрогского залива и Керченского пролива значения  $Ur > 20$ , что указывает на нелинейный режим волнового поля (нелинейность/усиление асимметрии гребней на мелководье) и необходимость использования LES.

На открытой границе с Чёрным морем использовались спектры волн SWAN и поля уровня WAVEWATCH III. Река Дон и Кубань заданы как притоки с расходом  $Q = 3000 - 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ . Температура и солёность заданы по данным CMEMS (Copernicus Marine Service).

Значительная высота волн  $H_s$  определялась как:

$$H_s = 4\sqrt{m_0}, \quad m_0 = \int_0^\infty S(f)df,$$

где  $S(f)$  — спектральная плотность энергии волн,  $\text{м}^2/\text{Гц}$ .

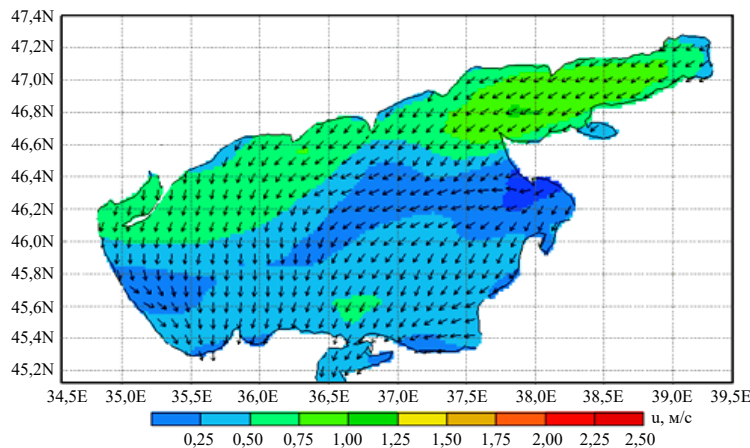


Рис. 3. Скорость ветра на высоте 10 метров в начальный момент моделирования для сценария 1, стрелками показано направление ветра

Результаты численного эксперимента:

- В сценарии 1:  $H_s \approx 1,2-1,6$  м в центре моря. Амплитуда колебаний уровня воды достигала 0,42 м в Таганрогском заливе. Векторы скоростей показали возвратно-поступательные течения с максимальными значениями 0,35 м/с. На карте амплитуды отчётливо выделяется зона Керченского пролива как область усиленных течений.

- В сценарии 2:  $H_s \approx 2,8-3,1$  м в Керченском проливе,  $H_s \approx 2,4-2,9$  м у побережья Таганрога. Наблюдалось интенсивное стонно-нагонное явление: уровень воды у восточного побережья поднялся на 1,2 м, а у западного упал на  $-0,8$  м.

- В сценарии 3: пиковые значения  $H_s \approx 3,1-4,0$  м, с экстремальными нагонными явлениями до 1,5 м в Таганрогском заливе. Совмещение прилива и шторма усилило резонансные эффекты. В Керченском проливе зарегистрированы максимальные скорости течений 1,1 м/с. Вблизи судовых фарватеров условия близки к критическим для судоходства.

Локальные эффекты (преломление и дифракция) ярко выражены в районе Керченского пролива, где высота волны уменьшалась на 20–30 % за счет геометрии береговой линии. Использование LES позволило выявить локальные зоны генерации вихревых структур в районах с резким изменением глубин (Таганрогский залив, устья рек Дон и Кубань). Эти зоны сопряжены с интенсивным перемешиванием осадков и переносом загрязняющих веществ. При шторме (сценарий 2) фиксировались крупные вихри диаметром 2–5 км в районе выхода Дона; в Керченском проливе проявлялись вихри меньшего масштаба (0,5–1 км), влияющие на распределение наносов. Такие структуры ранее отмечались в натурных измерениях, что подтверждает реалистичность модели. Использование LES-модели со схемой Смагоринского позволило выявить зоны интенсивного турбулентного обмена.

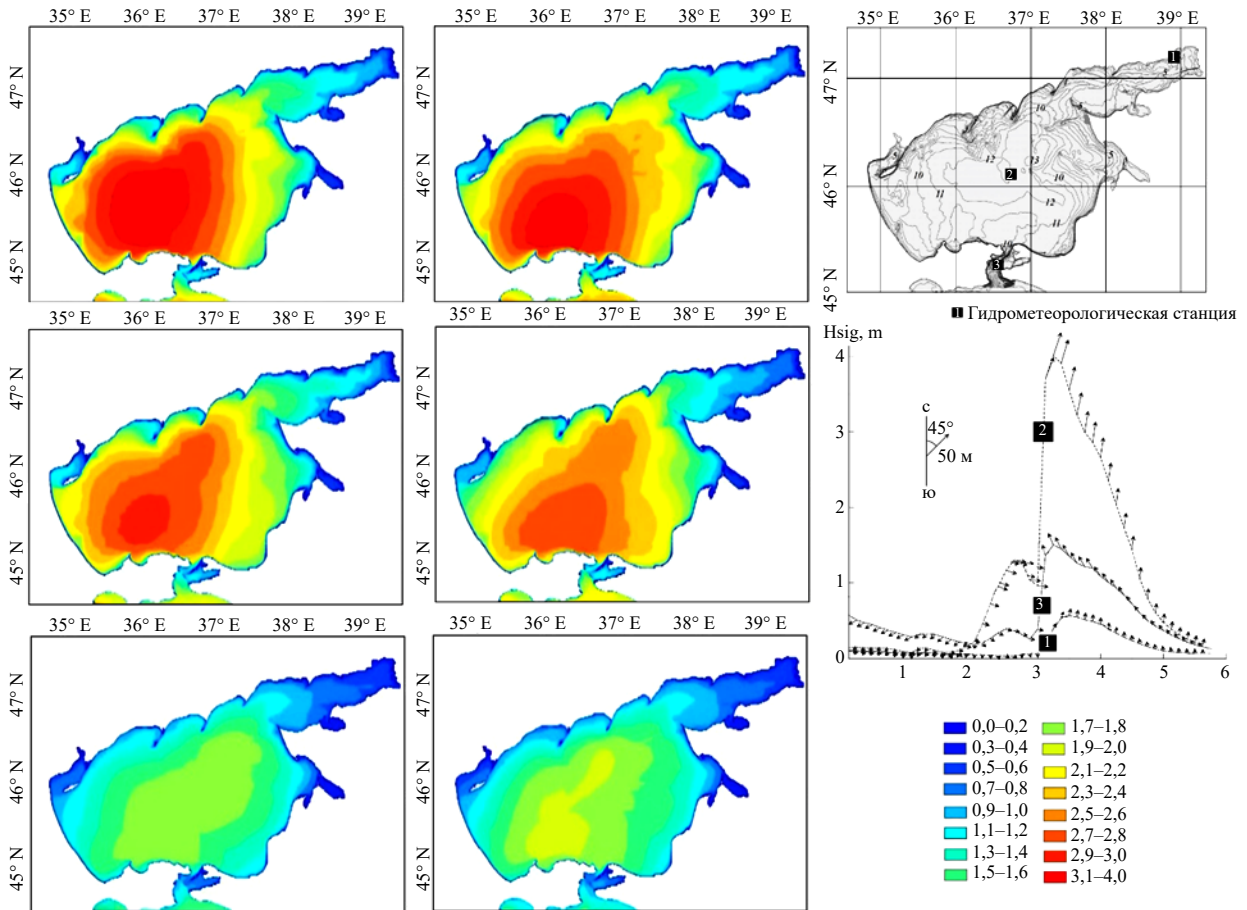


Рис. 4. Карты высот значительных волн и динамика ветро-волновых параметров в трех точках при различных сценариях: 1 ряд — сценарий 1; 2 ряд — сценарий 2; 3 ряд — сценарий 3

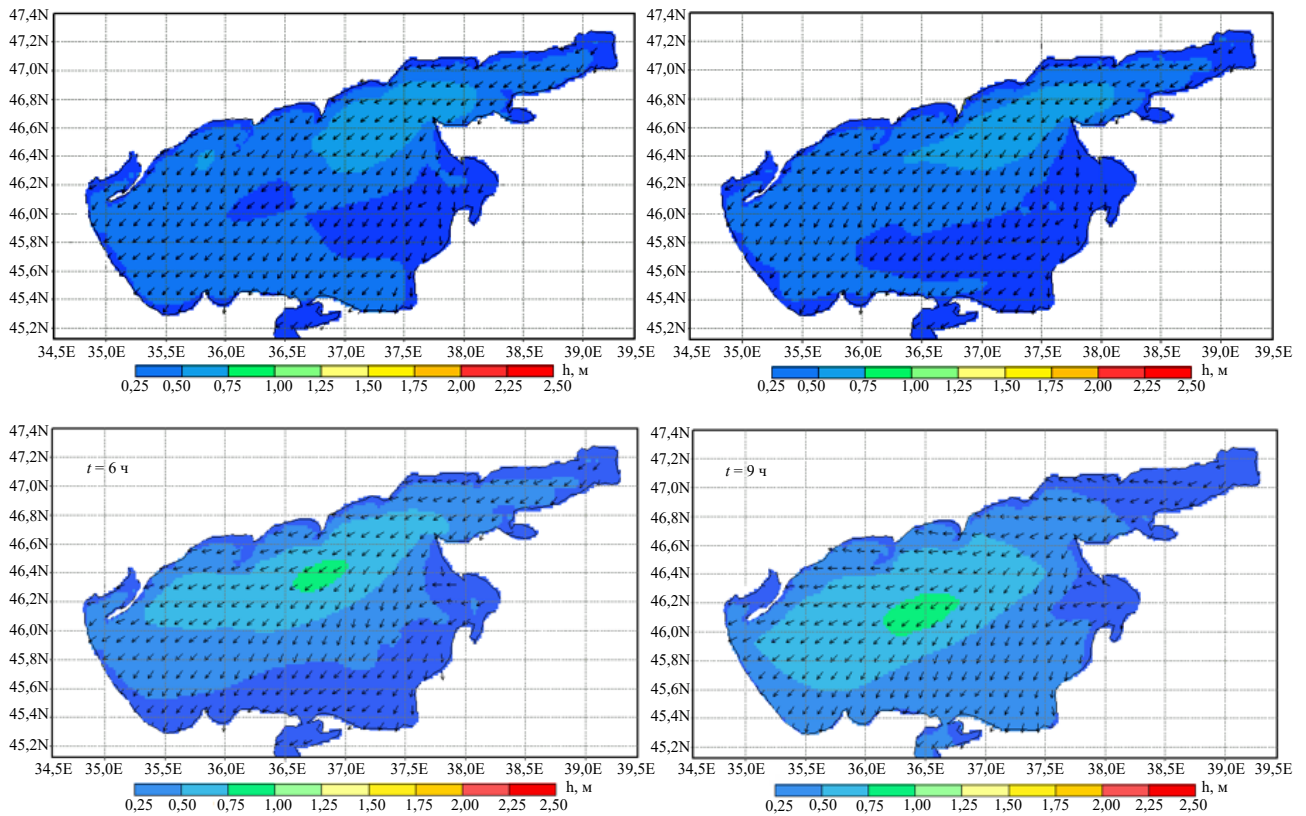


Рис. 5. Результаты моделирования высот преобладающих волн в различные моменты времени: в начальный момент, через 3, 6 и 9 часов для сценария 1. Стрелками показано среднее направление распространения волн

Сгенерировано 40 ансамблевых прогонов с возмущёнными ветровыми полями ( $\pm 15\%$  по скорости,  $\pm 10^\circ$  по направлению). Вероятность превышения критической высоты волны  $H_{cr} = 3,5$  м рассчитывалась по формуле:

$$P(H_s > H_{cr}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(H_s^{(i)} > H_{cr}) \approx 0,42.$$

Таким образом, вероятность экстремального воздействия в центральной части моря составила 42 %.

**Применение нейросетевых моделей.** Рассмотрим применение нейросетевых моделей (PINNs и FNO). PINNs использованы для аппроксимации локальных гидродинамических полей в Таганрогском заливе. Средняя ошибка по метрике  $L_2$ :  $e_{L_2} < 4,7\%$ . FNO позволили ускорить ансамблевые расчёты в 12 раз при сохранении точности (по  $H_s$ ,  $\eta$ ) на уровне  $< 8\%$ .

Применение PINNs обеспечило соблюдение физических ограничений и позволило сократить ошибки аппроксимации по сравнению с классическими нейросетями на 35 %. FNOs сократили вычислительное время ансамбля в среднем в 12 раз, что делает возможным использование методики в системах раннего предупреждения.

**Карты риска повреждения инфраструктуры.** Построены карты риска повреждения инфраструктуры (Керченский пролив, порты Таганрога и Ейска), которые выявили зоны максимальной уязвимости.

Оценка ударных давлений (пиковая оценка на вертикальной стенке):

$$q_{dyn} \approx \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2, \quad U_{rel} \approx u_{orbital} + U_{cur}.$$

Для гребня:

$$\begin{aligned} u_{orbital} &\approx a\omega \text{ (глубокая вода),} \\ a &= H / 2 = 3,5 \text{ м,} \\ \omega &= 0,628 \text{ с}^{-1}, \\ u_{orbital} &\approx 2,2 \text{ м/с,} \\ U_{cur} &= 2,5 \text{ м/с,} \\ U_{rel} &\approx 4,7 \text{ м/с,} \\ q_{dyn} &\approx 0,5 \times 1000 \times 4,72 \approx 11000 \text{ Па.} \end{aligned}$$

С учётом «слэмминга» (мультипликатор 5–10)  $\Rightarrow 0,055\text{--}0,11$  МПа.

Для построения карты с кривыми уязвимости использовался подход:

$$P(D \geq d|x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\beta}\right), \quad x \equiv q_{impact}.$$

Зоны высокой вероятности повреждений: акватории портов Таганрог, Ейск; порт Кавказ и берегозащитные участки у стеснённых береговых геометрий. Рассчитана мощность волн на единицу ширины гребня (глубокая вода):

$$P \approx \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e.$$

Для  $H_s = 7$  м,  $T_e \approx 10$  с,  $P \sim 2,3 \times 10^5$  Вт/м.

Таким образом, максимальные зоны риска судоходства сосредоточены в Керченском проливе и центральной части Азовского моря. Инфраструктурные объекты на побережье Таганрога и Ейска наиболее подвержены риску при сценарии С.

На основе совмещения результатов гидродинамических расчётов и кривых уязвимости инфраструктуры выполнено районирование зон потенциального ущерба. Сценарий 1 характеризуется локальными, но не критическими подъемами уровня и умеренными волнами. Сценарий 2 приводит к экстремальным волновым условиям, опасным для судоходства и береговой инфраструктуры. При сценарии 2 прогнозируются зоны высокой вероятности повреждения портовой инфраструктуры в районах Таганрога и Ейска. Для береговой инфраструктуры (порт Таганрог, Ейск) вероятность превышения критического давления на сооружения в сценарии 2 составила 0,65. Сценарий 3 демонстрирует кумулятивный эффект: хотя волны ниже, длительный нагон создает затопления в низменных районах побережья. Для сценария 3 в зоне риска оказываются также порт Кавказ и транспортный переход через Керченский пролив. Таким образом, экстремальные последствия могут быть вызваны как пиковыми, так и продолжительными воздействиями.

Для проверки достоверности выполненных оценок зон потенциального ущерба результаты гидродинамического моделирования были сопоставлены с данными спутниковых снимков, обработанных программным комплексом «LBP-neural\_network» [25–27]. В частности, анализ для сценария 2 (экстремальный шторм) проводился с использованием снимков района станицы Ясенская за 17 и 22 марта 2023 года [28], представленные на рис. 6. На снимках наглядно демонстрируется значительное изменение береговой линии и площадей затопления, вызванные штормовым воздействием.

Программный комплекс «LBP-neural\_network» обеспечил высокоточное выделение актуальных контуров береговой линии и затопленных территорий, что позволило провести количественное сравнение с прогнозируемой моделью зонами воздействия. Установлено, что смоделированные границы зон затопления и динамики берега удовлетворительно соответствуют контурам, выделенным на спутниковых данных.

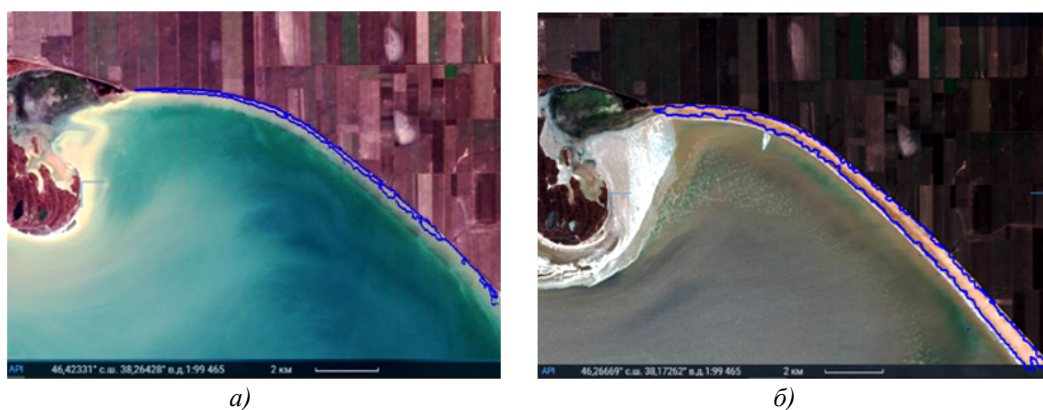


Рис. 6. Снимки района исследований — станции Ясенская:  
 а — 17 марта 2023 г.; б — 22 марта 2023 г.

Кроме того, распределения волновых полей и течений, полученные в модели, показали хорошую сходимость с независимыми спутниковыми измерениями (Sentinel-1, Sentinel-3, Copernicus Marine Service). Количественная оценка расхождений показала, что среднеквадратичная ошибка для ключевых параметров (таких как значительная высота волны и скорость поверхностных течений) не превышала 8–10 %, что подтверждает адекватность и точность применяемой гидродинамической модели.

Таким образом, получены следующие основные результаты.

Для экстремального шторма значительная высота волны в центральной части Азовского моря достигала 5,2 м, что сопоставимо с катастрофическими событиями 2012 и 2021 гг. В проливе локально увеличивается крутизна волн из-за сжатия фронтов. Рассчитаны течения в проливе, которые составили 2,5–3,0 м/с; число Фруда  $Fr = U / \sqrt{gh} \approx 0,21$  указывает на существенную инерционность, но без критического разгона.

Вероятность превышения опасного уровня волнения  $H_{cr} = 4,5$  м составила 42 %, вероятность для  $H_s > 5$  м в центре Азовского моря  $\approx 0,78$ , в области побережья  $\approx 0,28$ . Рассчитаны ударные давления для инфраструктуры прибрежных участков: 0,055–0,11 МПа (с учётом слэмминга). Динамика судна показала развитие резонансных явлений, создающих риск опрокидывания. PINNs и FNO доказали эффективность гибридного подхода: высокую точность при значительном ускорении расчётов (в 12 раз).

Таким образом, разработанная модель корректно воспроизводит штормовые процессы в Азовском море. Наиболее опасные условия для судов возникают при сценарии 2 (сильный восточный шторм) и сценарии 3 (аномальный циклон). Сценарий комбинированного воздействия является наиболее опасным и должен учитываться при построении систем раннего предупреждения. Вероятность критических волн превышает 60 % в экстремальных условиях. На основе ансамблевых расчетов построены карты риска судоходства и инфраструктуры. Наиболее уязвимые зоны — Таганрогский залив и Керченский пролив. Таким образом, численные эксперименты показали эффективность предложенного подхода: сочетание LES, ансамблевого прогнозирования и методов оценки риска позволяет не только описывать штормовую динамику, но и количественно оценивать последствия для судоходства и прибрежных объектов. В отличие от традиционных спектральных моделей (SWAN, WAVEWATCH III), предложенный подход учитывает нелинейные взаимодействия волн и течений в мелководье, использует гибридный ансамблевый метод с привлечением нейросетевых суррогатных моделей (PINNs, FNOs), что ускоряет прогноз в 10–15 раз без потери точности, позволяет не только оценивать гидродинамику, но и проводить прямую оценку риска для судов и инфраструктуры. Полученные данные могут использоваться для построения карт риска затопления и повреждения судов.

**Обсуждение.** Результаты численных экспериментов подтверждают высокую эффективность предложенной многоуровневой методологии при моделировании экстремальных штормовых событий в Азовском море и Керченском проливе. Применение LES с замыканием Смагоринского позволило адекватно воспроизвести процессы волнового обрушения и генерации турбулентных вихрей, которые традиционно недостаточно описываются при использовании спектральных моделей [15]. В отличие от подходов, ограничивающихся усреднёнными параметрами (например, SWAN), использование CFD-подхода позволило учесть нелинейные эффекты и локальные взаимодействия волн и течений.

Сравнение с данными повторного анализа ERA5 и спутниковыми наблюдениями Sentinel-3 показало удовлетворительное согласие по полям значительной высоты волн и распределению уровня моря [22]. Особенно важно, что модель корректно воспроизводит экстремальные значения во время шторма марта 2023 года, когда скорость ветра достигала 30–35 м/с.

Интеграция методов искусственного интеллекта (PINNs и FNOs) продемонстрировала перспективность гибридных схем: PINNs обеспечивают физическую согласованность результатов, а FNOs позволяют существенно ускорить ансамблевые расчёты [18–19]. Такой подход открывает возможность создания оперативных систем раннего предупреждения о штормовых рисках, где скорость вычислений играет ключевую роль.

Ограничения исследования связаны, прежде всего, с пространственным разрешением ERA5 ( $\approx 30$  км), что приводит к недоучёту мелкомасштабных процессов, а также с ограниченностью данных верификации в центральной части Азовского моря. Дополнительная ассимиляция данных спутниковых альтиметров и береговых станций могла бы повысить точность прогноза.

С практической точки зрения, результаты работы подтверждают важность комплексного подхода при оценке навигационных рисков. Учет динамики «корабль — волна» позволил выявить опасные резонансные режимы, что особенно актуально для малых судов в Керченском проливе [17]. Полученные риск-карты могут быть непосредственно интегрированы в системы поддержки принятия решений для судоходных компаний и прибрежной инфраструктуры.

Таким образом, представленная методология сочетает физическую строгость, вычислительную эффективность и прикладную значимость. В дальнейшем предполагается развитие подхода за счет увеличения разрешения CFD-моделей, а также интеграции данных Copernicus Marine Service в режиме реального времени.

**Заключение.** Проведённое исследование продемонстрировало эффективность применения гибридного подхода, сочетающего численные методы и современные алгоритмы машинного обучения, для моделирования экстремальных гидродинамических процессов в Азовском море. В отличие от классических моделей, предлагаемая методология позволяет не только воспроизводить динамику уровня воды и волновых полей, но и оценивать пространственное распределение рисков для прибрежной инфраструктуры с повышенной точностью. Новизна работы заключается в интеграции PINNs и FNO в систему прогнозирования для конкретного регионального бассейна, что ранее не реализовывалось для Азовского моря. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшей разработки систем оперативного мониторинга, адаптации моделей к Черному морю и их применения в задачах устойчивого природопользования.

### Список литературы / References

1. Amarouche K., Akpinar A., Rybalko A., Myslenkov S.A. Assessment of SWAN and WAVEWATCH-III models regarding the directional wave spectra estimates based on Eastern Black Sea measurements. *Ocean Engineering*. 2023;272:113944. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113944>
2. Reduan Atan R., Nash S., Goggins J. Development of a nested local scale wave model for a 1/4 scale wave energy test site using SWAN. *Journal of Operational Oceanography*. 2017;10:59–78. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2016.1275495>
3. Masselink G., Russell P., Rennie A., Brooks S., Spencer T. Impacts of climate change on coastal geomorphology and coastal erosion relevant to the coastal and marine environment around the UK. *MCCIP Science Review*. 2020;158–189. <https://doi.org/10.14465/2020.arc08.cgm>
4. Yaitskaya N. The Wave Climate of the Sea of Azov. *Water*. 2022;14(4):555. <https://doi.org/10.3390/w14040555>
5. Veldman A., Luppens R., Bunnik T., Huijsmans R., Duz B., Iwanowski B., Wemmenhove R., Borsboom M., Wellens P., van der Heiden H., Plas P. Extreme Wave Impact on Offshore Platforms and Coastal Constructions. In: *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*. Rotterdam, Netherlands, 2011;7. <https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49488>
6. Elmisaoui S., Kissami I., Ghidaglia J.-M. High-Performance Computing to Accelerate Large-Scale Computational Fluid Dynamics Simulations: A Comprehensive Study. In: *Lecture Notes in Computer Science*. 2024. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-54318-0\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-031-54318-0_31)
7. Dietterich H., Lev E., Chen J., Richardson J., Cashman K. Benchmarking computational fluid dynamics models of lava flow simulation for hazard assessment, forecasting, and risk management. *Journal of Applied Volcanology*. 2017;6:9.
8. International Maritime Organization (IMO). Second Generation Intact Stability Criteria. *IMO Guidelines*. 2023. London, UK. URL: <https://www.imo.org> (дата обращения: 03.09.2025).
9. Chu Van T., Ramirez J., Rainey T., Ristovski Z., Brown R. Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019;70:123–134.
10. You J., Faltinsen O.M. A numerical investigation of second-order difference-frequency forces and motions of a moored ship in shallow water. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2015;1:157–179. <https://doi.org/10.1007/s40722-015-0014-6>
11. 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>
12. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-2-33-44>
13. Sukhinov A., Protsenko E., Protsenko S., Panasenko N. Wind Wave Dynamic's Analysis Based on 3D Wave Hydrodynamics and SWAN Models Using Remote Sensing Data. In: *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022)*. Zokirjon ugli K.S., Muratov A., Ignateva S. (eds). Springer, Cham, Switzerland. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023;733:1–12. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-37978-9\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37978-9_39)
14. Kantamaneni K. Coastal infrastructure vulnerability: an integrated assessment model. *Natural Hazards*. 2016;84:139–154. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2413-y>

14. Protsenko E.A., Protsenko S.V., Sidoryakina V.V. Predictive Mathematical Modeling of Sedimentation and Coastal Abrasion Relief Transformation Processes. *Journal of Mathematical Sciences*. 2024;284:126–139. <https://doi.org/10.1007/s10958-024-07331-6>
15. Meyers J., Sagaut P. On the model coefficients for the standard and the variational multi-scale Smagorinsky model. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006;569:287–319. <https://doi.org/10.1017/S0022112006002850>
16. Janssen P.A.E.M. Quasi-linear Theory of Wind-Wave Generation Applied to Wave Forecasting. *Journal of Physical Oceanography*. 1991;21(11):1631–1642. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<1631:QLTOWW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<1631:QLTOWW>2.0.CO;2)
17. Faltinsen O.M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. 1st ed. Cambridge University Press: Cambridge, UK; 1990. Pp. 1–5.
18. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. 2019;378:686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
19. Luo Y., Li Y., Sharma P., Shou W., Wu K., Foshey M. et al. Learning human–environment interactions using conformal tactile textiles. *Nat Electron*. 2021;4:193–201. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00558-0>
20. Сухинов А.И., Проценко С.В., Панасенко Н.Д. математическое моделирование и экологическое проектирование состояния морских систем с учетом разномасштабной турбулентности с использованием данных дистанционного зондирования. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2022;6(3):104–113. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2022-1-3-104-113>
21. Sukhinov A.I., Protsenko S.V., Panasencko N.D. Mathematical modeling and ecological design of marine systems taking into account multi-scale turbulence using remote sensing data. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2022;6(3):104–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2022-6-3-104-113>
22. Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S. Recurrence of Storm Waves in the Sea of Azov according to Modeling. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2024;49:1061–1066. <https://doi.org/10.3103/S1068373924120045>
23. *The official website of The Copernicus Climate Change Service (C3S)*. URL: <https://climate.copernicus.eu/> (дата обращения: 12.09.2025).
24. *The official website of International Hydrographic Organization*. URL: <https://iho.int/> (дата обращения: 12.09.2025).
25. Protsenko E.A., Sukhinov A.I., Protsenko S.V. Numerical Modelling of Hydrodynamic Wave Processes in the Azov Sea Based on the WAVEWATCH III Wind-Wave Model. *Computational Mechanics of Continuous Media*. 2025;17(4):422–431. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2025-17-4-422-431>
26. Sukhinov A.A., Ostrobrod G.B. Efficient face detection on Epiphany multicore processor. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2017;1(1):1–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2017-1-1-1-15>
27. Sukhinov A., Panasencko 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.
28. Panasencko N.D. Forecasting the coastal systems state using mathematical modeling based on satellite images. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;7(4):54–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-4-54-6>
29. *The official website of Earth Observing System*. URL: <https://eos.com/landviewer/account/pricing> (дата обращения: 12.09.2025).

#### Об авторах:

**Александр Иванович Сухинов**, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор НИИ Математического моделирования и прогнозирования сложных систем Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [MathSciNet](#), [sukhinov@gmail.com](mailto:sukhinov@gmail.com)

**Софья Владимировна Проценко**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, научный сотрудник Таганрогского института им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (347936, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [rab5555@rambler.ru](mailto:rab5555@rambler.ru)

**Елена Анатольевна Проценко**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, ведущий научный сотрудник Таганрогского института им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (347936, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [capros@rambler.ru](mailto:capros@rambler.ru)

**Наталья Дмитриевна Панасенко**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и информатика», доцент кафедры «Информационная безопасность в вычислительных системах и сетях» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [natalija93\\_93@mail.ru](mailto:natalija93_93@mail.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

**А.И. Сухинов:** общее научное руководство; постановка задачи; формулировка идей исследования, целей и задач; разработка методологии.

**С.В. Протченко:** разработка концепции; научное руководство.

**Е.А. Протченко:** курирование данных; деятельность по аннотированию, очистке данных и поддержанию их целостности; разработка программного обеспечения; визуализация.

**Н.Д. Панасенко:** валидация; тестирование существующих компонентов.

**Конфликт интересов:** *авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**About the Authors:**

**Alexander I. Sukhinov**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Research Institute of Mathematical Modeling and Forecasting of Complex Systems, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [MathSciNet](#), [sukhinov@gmail.com](mailto:sukhinov@gmail.com)

**Sofia V. Protsenko**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Research Fellow, A.P. Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics (48, Initiative St., Taganrog, 347936, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [rab5555@rambler.ru](mailto:rab5555@rambler.ru)

**Elena A. Protsenko**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Leading Research Fellow, A.P. Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics (48, Initiative St., Taganrog, 347936, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [eapros@rambler.ru](mailto:eapros@rambler.ru)

**Natalia D. Panasenکو**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics and Computer Science, Associate Professor of the Department of Information Security in Computing Systems and Networks, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [natalija93\\_93@mail.ru](mailto:natalija93_93@mail.ru)

**Contributions of the authors:**

**A.I. Sukhinov:** general scientific supervision; problem statement; formulation of research ideas, goals and objectives; development of methodology.

**S.V. Protsenko:** concept development; scientific guidance.

**E.A. Protsenko:** data management; annotation, data cleaning, and maintaining data integrity; software development; visualization.

**N.D. Panasenکو:** validation; testing of existing components.

**Conflict of Interest Statement:** *the authors declare no conflict of interest.*

*All authors have read and approved the final manuscript.*

**Поступила в редакцию / Received 01.10.2025**

**Поступила после рецензирования / Reviewed 22.10.2025**

**Принята к публикации / Accepted 17.11.2025**