

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-94-113>

УДК 551.466.33/.32

Оценка качества прогноза высоты волн и скорости ветра в Цемесской бухте Черного моря

**А.Д. Рыбалко¹, С.А. Мысленков^{1,2,3,4}, Е.Е. Круглова¹,
А.В. Григорьев⁵, В.Г. Сенченко⁶**

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова
Российской академии наук, Москва, Россия;

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;

³Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

⁴Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, г. Москва, Россия;

⁵Государственный океанографический институт
имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия;

⁶Государственный морской университет
имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», г. Новороссийск, Россия
rybalko.ad@ocean.ru

Исследована точность прогноза высоты ветровых волн в акватории Цемесской (Новороссийской) бухты с использованием спектральной модели WAVEWATCH III и прогноза ветра GFS (0.25°). Сравнение модельных расчетов с натурными измерениями, выполненными на пирсе Шесхарис в период декабрь 2023 – август 2025 гг., показало, что качество прогноза высоты волн для заблаговременности до трех суток удовлетворительное. Среднеквадратическая ошибка для прогноза высоты значительных волн составляет 0.17–0.22 м, коэффициент корреляции — 0.85–0.9, систематическая ошибка отрицательная (–0.09 – –0.13 м). Минимальные ошибки получены для заблаговременности 15 ч. Анализ сезонной изменчивости показал повышение точности прогноза в осенне-зимний период и снижение в весенне-летний сезон из-за влияния локальных ветровых эффектов. Установлено, что при ветрах с моря модель воспроизводит высоту волн точнее, чем при ветрах с суши. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности оперативных систем прогнозирования волнения и обеспечения безопасности морских операций в акватории Цемесской бухты.

Ключевые слова: Черное море, Цемесская бухта, ветровое волнение, прогноз волн, спектральная модель, WAVEWATCH III, GFS, точность прогноза, заблаговременность, Новороссийская бора

Evaluation of Wave Height and Wind Speed Forecast Quality in the Tsemess Bay of the Black Sea

A.D. Rybalko¹, S.A. Myslenkov^{1,2,3,4}, Kruglova E.E.¹,
A.V. Grigoriev⁵, V.G. Senchenko⁶

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

²*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

⁴*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

⁵*N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow, Russia;*

⁶*Admiral Ushakov maritime state university, Novorossiysk, Russia
rybalko.ad@ocean.ru*

A study was conducted to assess the accuracy of wind wave height forecasts in the Tsemess (Novorossiysk) Bay using the spectral model WAVEWATCH III forced by GFS winds (0.25°). Comparison of model simulations with in situ measurements obtained at the Sheskhari pier during December 2023 – August 2025 showed that the system provides satisfactory forecast quality of wave heights for different lead times up to 72 hours. The root-mean-square error of significant wave height forecasts ranges from 0.17 to 0.22 m, the correlation coefficient is 0.85–0.9, and the systematic bias is negative (–0.09...–0.13 m). The smallest errors were observed for a lead time of 15 hours. Seasonal variability analysis revealed higher forecast accuracy in the autumn–winter period and lower accuracy in the spring–summer season due to the influence of local wind effects. It was found that the model reproduces wave characteristics more accurately during offshore winds (from sea to land) than during onshore winds (from land to sea). The obtained results can be used to improve the accuracy of operational wave forecasting systems and to enhance maritime safety in the Tsemess Bay area.

Keywords: Black Sea, Tsemess Bay, wind waves, wave forecast, spectral model, WAVEWATCH III, GFS, forecast accuracy, lead time, Novorossiysk bora

Введение

Цемесская (Новороссийская) бухта представляет собой залив в северо-восточной части Черного моря, ограниченный Суджукской косой с запада и мысом Дооб с востока, с глубинами до 27 м и протяженностью береговой линии около 15 км [1]. Цемесская бухта является одним из ключевых центров судоходной, портовой и промышленной деятельности на российском побережье Черного моря [7]. Здесь круглогодично функционирует крупнейший морской торговый порт России, через который проходят нефть и нефтепродукты, контейнерные грузы, продовольствие и лесоматериалы. Поскольку акватория незамерзающая, именно ветро-волновой режим является главным лимитирующим фактором успешного проведения портовых и морских операций: даже умеренное волнение приводит к вынужденным остановкам работ и аварийным ситуациям [7, 15]. Ветровые волны также являются значимым фактором в эрозии берегов при том, что для Черноморского побережья Кавказа характерно преобладание эрозионных

процессов над аккумулятивными и имеется дефицит пляжей [13]. Таким образом, работы связанные с прогнозом ветра и волн, являются актуальными для рассматриваемой акватории.

Климат восточного побережья Черного моря формируется под влиянием макроциркуляционных процессов Средиземноморского климатического региона. Основные сезонные особенности погоды связаны с взаимодействием Сибирского и Азорского максимумов, Азиатского минимума и Средиземноморского циклона [6, 8]. Как и для всего Черного моря, для акватории Цемесской бухты наиболее неблагоприятные ветро-волновые условия характерны для зимнего сезона – с конца ноября по март. Наибольшее влияние на формирование штормового волнения оказывают ветра южного, юго-западного и западного направлений [2]. Географическое положение бухты у подножья Маркотхского хребта и ее открытость к морю обуславливают высокую подверженность воздействию экстремальных гидрометеорологических явлений. Среди них особое место занимает новороссийская бора – сильный порывистый ветер, дующий с прибрежных горных хребтов на море. В среднем в Новороссийске наблюдается около 45 дней с борой в год, причем примерно в половине случаев скорость ветра достигает штормовых значений (20 м/с), а в отдельные годы наблюдаются аномально сильные события с порывами до 40–50 м/с, вызывающие катастрофические последствия [5, 12, 24, 29]. Даже при северо-восточных ветрах, несмотря на сравнительно короткий разгон, в акватории бухты может формироваться волнение с высотами волн до 1.5 м [7]. Все это подчеркивает необходимость совершенствования методов прогноза волнения для данного района.

В настоящее время существует несколько зарубежных и отечественных систем прогноза волнения в Черном море [19, 20, 31]. В ФГБУ «Гидрометцентр России» действует комплексная система оперативного прогноза волнения в Мировом океане и морях России на основе модели WAVEWATCH III с заблаговременностью до пяти суток [10, 11]. В этой системе реализуется подход сопряжения глобальных вычислительных сеток грубого пространственного разрешения с региональными сетками высокого разрешения в прибрежной зоне.

Наиболее важной характеристикой для каждой системы является достоверность воспроизведения параметров волнения, которая оценивается по данным прямых измерений или спутников [9, 27]. При анализе ошибок прогнозов возникают предпосылки для модернизации и улучшения систем прогноза. Основными источниками ошибок в моделях ветрового волнения являются поля ветра, которые, как правило, содержат ошибки. Кроме того, немаловажным является использование качественной батиметрии в прибрежной зоне. В [16] проведен анализ качества прогноза высоты волн при использовании региональных атмосферных моделей (например, WRF). В [24] показано, что величина среднеквадратической ошибки для прогноза высоты волн в среднем для Черного моря для заблаговременности 63 часа составляет 0.41 м для прогноза ветра GFS и 0.44 м при использовании

прогнозов COSMO-Ru. Вместе с тем сохраняется неопределенность, связанная как с качеством ветровых полей, так и с параметризацией нелинейных процессов в спектральных моделях [19].

Таким образом, прогнозирование ветрового волнения в Цемесской бухте остается важной научной и прикладной задачей. Сочетание высокой социально-экономической значимости региона и специфики локальной атмосферной циркуляции определяет необходимость дальнейших исследований в области численного моделирования волнения и повышения точности прогностических систем.

В настоящей работе выполнены оценки качества прогноза высоты волн по модели WAVEWATCH III на основе данных измерений в Цемесской бухте за период с декабря 2023 по август 2025 года, а также выполнены оценки качества скорости ветра прогнозов GFS на основе данных метеостанции.

Материалы и методы

Прогноз волнения выполнялся с использованием модели WAVEWATCH III [29] и прогностических полей ветра GFS 0.25° для акватории Цемесской бухты. Данная система прогнозов является развитием методов, описанных в работах [11, 17, 23, 30]. Выбор модели WAVEWATCH III обусловлен двумя ключевыми факторами. Во-первых, это основная модель, используемая Гидрометцентром России для оперативного прогноза волнения [10, 11], что обеспечивает согласованность и преемственность наших исследований с действующей системой прогноза. Во-вторых, современные версии моделей SWAN и WAVEWATCH III при одинаковых настройках, вычислительной сетке и форсинге дают практически одинаковые результаты, поэтому использование модели WAVEWATCH III представляется более методически оправданным для последующей интеграции в оперативную систему. Оперативный прогноз параметров ветрового волнения для Черного и Азовского морей выполняется ежедневно с заблаговременностью 72 часа с шагом 3 часа. В модели используется неструктурная вычислительная сетка, включающая в себя Черное и Азовское моря с шагом по пространству 6–12 км, а также прибрежную зону с шагом до 200 м (рис. 1а). Общее количество узлов сетки в рассматриваемой зоне составляет 59690. Данная вычислительная сетка успешно применялась для диагностических расчетов ветрового волнения [21, 22]. Благодаря неструктурной вычислительной сетке, эта система более приспособлена для прогноза ветрового волнения в прибрежных и мелководных районах.

Выходными данными модели являются следующие характеристики ветрового волнения: высота значительных волн, среднее направление их распространения, средняя длина и средний период волн. Под высотой волн в данном исследовании везде подразумевается высота значительных волн – стандартная метрика для ветровых волн. Со статистической точки зрения высота значительных волн определяется через спектральный анализ как четыре квадратных корня из нулевого момента волнового спектра (m_0): $H_s = 4\sqrt{m_0}$.

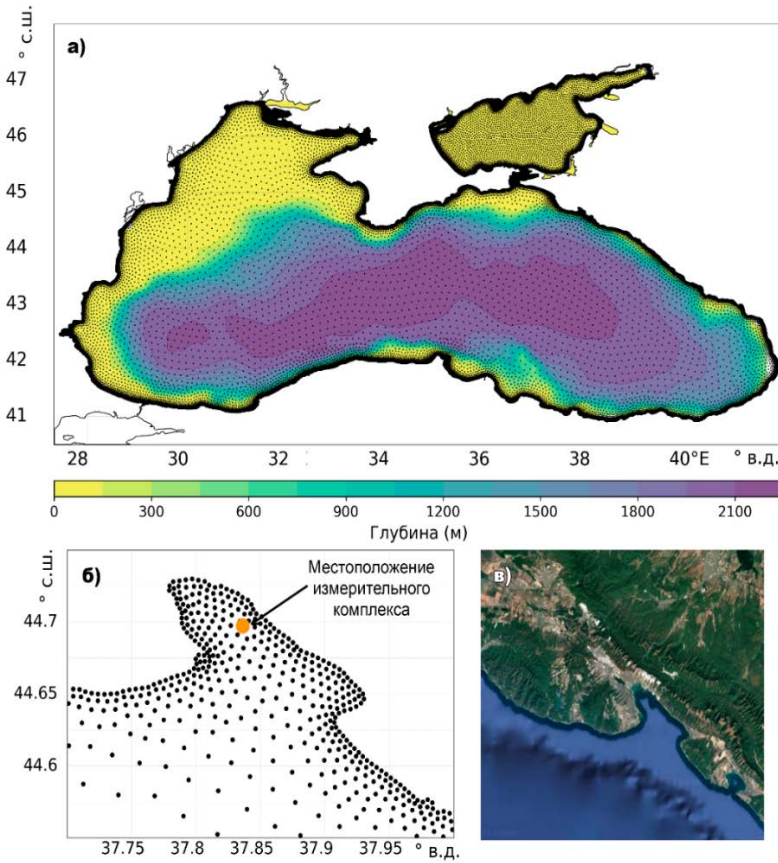


Рис. 1. Неструктурная сетка (а), узлы расчета модели в районе Цемесской бухты, оранжевым кружком отмечено местоположение измерительного комплекса (б); общий вид местности вокруг Цемесской бухты (в).

Fig. 1. Unstructured grid (a); model computation nodes in the area of Tsemes Bay, with the location of the measuring complex marked by an orange circle (б); general view of the area around Tsemes Bay (в).

Данные измерений

Для оценки качества прогноза высоты волн результаты моделирования сопоставлялись с данными инструментальных измерений в Цемесской бухте на пирсе Шесхарис (рис. 1б). Измерения выполнены прибором “Комплекс гидрологический ГМУ-4”. Он представляет собой автоматический автономный комплекс, предназначенный для измерения уровня моря, температуры воды, параметров волнения и атмосферного давления. Прибор измеряет высоту значительных волн, максимальную высоту волн и средний период. Шаг по времени в измерениях был около 10 минут. Для анализа использованы данные с 22.12.2023 по 22.08.2025 с некоторыми пропусками. В сумме пропуски по датам составляют 9,5 %, а всего доступных

записей более 15 тысяч и они охватывают все месяцы, что позволяет выполнить оценки качества прогнозов не только для всего периода, но и для отдельных сезонов.

Параметры оценки качества прогноза

Для сопоставления прогностических данных с измерениями ряд измерений был интерполирован на трехчасовые сроки, соответствующие выходным данным модели. Для каждой пары «модель – измерение» рассчитывался набор статистических характеристик:

- MAE (Mean Absolute Error) – средняя абсолютная ошибка;
- RMSE (Root Mean Square Error) – среднеквадратическая ошибка;
- Bias – систематическая ошибка;
- SI (Scatter Index) – индекс рассеяния (RMSE, отнесенный к среднему измеренному значению);
- R – коэффициент корреляции Пирсона.

Стандартные статистические характеристики были рассчитаны по следующим формулам:

$$Bias = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (P_i - O_i); \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}; \quad (2)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i}; \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2)(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2)}}, \quad (4)$$

где N – общее количество данных; P_i – прогноз; O_i – наблюдение; \bar{P} – среднее значение по прогнозу; \bar{O} – среднее значение по наблюдениям.

Перечисленные статистические характеристики являются стандартными в практике оценки прогнозов [18] и наиболее широко используемыми, что позволяет сопоставлять полученные результаты с расчетами, выполненными в работах других авторов. Однако стоит отметить, что в общем случае пара случайных величин «прогноз – наблюдение» образует двумерное распределение, из которого могут быть получены условные распределения и другие статистики более высокого порядка, позволяющие анализировать структуру ошибок. Подобные методы анализа совместных распределений подробно рассматривались в работах [3, 4, 14]. Данный подход представляется перспективным направлением для будущих исследований.

Также для гидрометеорологических прогнозов часто используется показатель оправдываемости [18], который определяется как «степень соответствия диапазона (градации) прогнозируемого значения метеорологической величины (с учетом допуска) фактически наблюдавшемуся значению

метеорологической величины, выраженная в процентах». Для расчета оправдываемости в настоящем исследовании в качестве допустимой ошибки прогноза была принята величина, равная 30 % от наблюдаемой высоты волны. То есть прогноз считался оправдавшимся, если

$$\frac{o_i - P_i}{o_i} \cdot 100 \leq 30, \quad (5)$$

Причем, согласно [18], прогноз считается оправдавшимся при любой наблюдаемой высоте волн от 0 до 0.25 м, так как в данном исследовании рассматривается акватория бухты.

Результаты

Общий объем статистической выборки для анализа точности прогноза составил 11 559 пар значений «модель – измерение» для значимой высоты волн. На рис. 2 показаны модельные и измеренные временные ряды для заблаговременности 15 часов и 63 часа. За весь период доступных инструментальных наблюдений средняя высота значительных волн в акватории Цемесской бухты составила 0.35 м при медианном значении 0.22 м, что указывает на преобладание слабого волнения. В течение анализируемого интервала времени было зарегистрировано три синоптических события, когда высота волн превышала 2 м. Анализ высоты волн согласуется с режимом волнения для всего Черного моря и с его сезонными особенностями [25, 26, 28]. Наиболее высокие волны наблюдались в зимние месяцы (декабрь–февраль), а минимальные значения высоты волн были характерны для летнего периода (июнь–август).

При анализе рис. 2 видно, что модель воспроизводит основные события, однако занижает высоту волн. С увеличением заблаговременности занижение становится больше.

Далее для каждой заблаговременности прогноза были рассчитаны статистические характеристики: MAE, RMSE, Bias, SI, R. Их значения представлены на рис. 3 и в таблице.

Анализ точности прогноза показал, что в среднем ошибка RMSE составляет 0.17–0.22 м, коэффициент корреляции 0.85–0.9, а систематическая ошибка всегда отрицательная -0.09 – -0.13 м. При заблаговременности 15 часов наблюдается повышение точности прогноза: значения MAE (0.12 м) и RMSE (0.17 м) уменьшаются, систематическое смещение составляет -0.09 м, а индекс рассеяния снижается до 0.48 при сохранении высокой корреляции с измерениями (0.9).

Следует отметить, что более высокое качество прогнозов наблюдается также для заблаговременностей 39 часов и 63 часа (кратно 15+24 и 15+48). Вероятно, это связано с усвоением данных измерений атмосферной моделью и, как следствие, неравномерным качеством прогноза ветра с увеличением заблаговременности, либо с бризовой циркуляцией, имеющей суточную цикличность, которая глобальной моделью плохо воспроизводится.

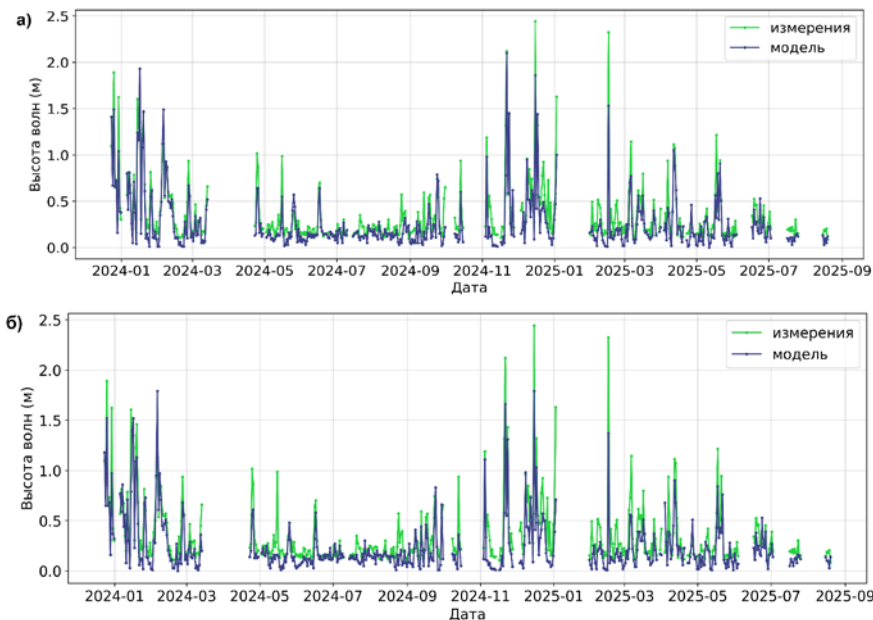


Рис. 2. Временные ряды высоты волн по результатам измерений и моделирования: заблаговременность 15 ч (а); 63 ч (б).

Fig. 2. Time series of wave height from measurements and model results: lead time of 15 h (a); 63 h (b).

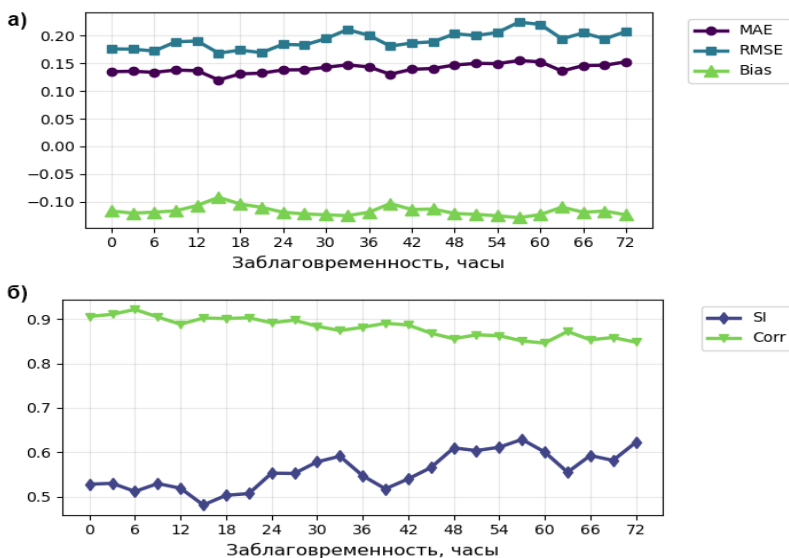


Рис. 3. Значения метрик качества прогноза (MAE, RMSE, BIAS, SI, R) в зависимости от заблаговременности прогноза.

Fig. 3. Forecast quality metrics (MAE, RMSE, BIAS, SI, R) for different forecast lead times.

Таблица. Значения метрик качества прогноза (MAE, RMSE, BIAS, SI, R) в зависимости от заблаговременности прогноза. Выделены минимальные значения ошибок и максимальная корреляция

Table. Forecast quality metrics (MAE, RMSE, BIAS, SI, R) for different forecast lead times. Minimum error values and the maximum correlation are highlighted

Заблаговременность, часы	Кол-во пар	MAE	RMSE	Bias	SI	R
0	456	0.13	0.18	-0.12	0.53	0.91
3	461	0.14	0.18	-0.12	0.53	0.91
6	465	0.13	0.17	-0.12	0.51	0.92
9	466	0.14	0.19	-0.12	0.53	0.90
12	465	0.14	0.19	-0.11	0.52	0.89
15	462	0.12	0.17	-0.09	0.48	0.90
18	464	0.13	0.17	-0.10	0.50	0.90
21	462	0.13	0.17	-0.11	0.51	0.90
24	456	0.14	0.18	-0.12	0.55	0.89
27	461	0.14	0.18	-0.12	0.55	0.90
30	465	0.14	0.19	-0.12	0.58	0.88
33	466	0.15	0.21	-0.13	0.59	0.87
36	465	0.14	0.20	-0.12	0.55	0.88
39	462	0.13	0.18	-0.10	0.52	0.89
42	464	0.14	0.19	-0.11	0.54	0.89
45	462	0.14	0.19	-0.11	0.57	0.87
48	456	0.15	0.20	-0.12	0.61	0.86
51	461	0.15	0.20	-0.12	0.60	0.86
54	465	0.15	0.21	-0.13	0.61	0.86
57	466	0.16	0.22	-0.13	0.63	0.85
60	465	0.15	0.22	-0.12	0.60	0.85
63	462	0.14	0.19	-0.11	0.55	0.87
66	464	0.15	0.20	-0.12	0.59	0.85
69	462	0.15	0.19	-0.12	0.58	0.86
72	456	0.15	0.21	-0.12	0.62	0.85

При увеличении заблаговременности наблюдается ухудшение качества прогноза. Следует отметить, что коэффициент рассеяния меняется от 0.48 до 0.62, что является не очень хорошим результатом. Однако в данном случае волнение, как правило, слабое – среднее значение 0.3 м для всей выборки, и модель при слабом ветре работает неустойчиво, тем более что имеют место локальные ветровые эффекты.

Диаграммы рассеяния для заблаговременностей 15, 39 и 63 часов показаны на рис. 4.

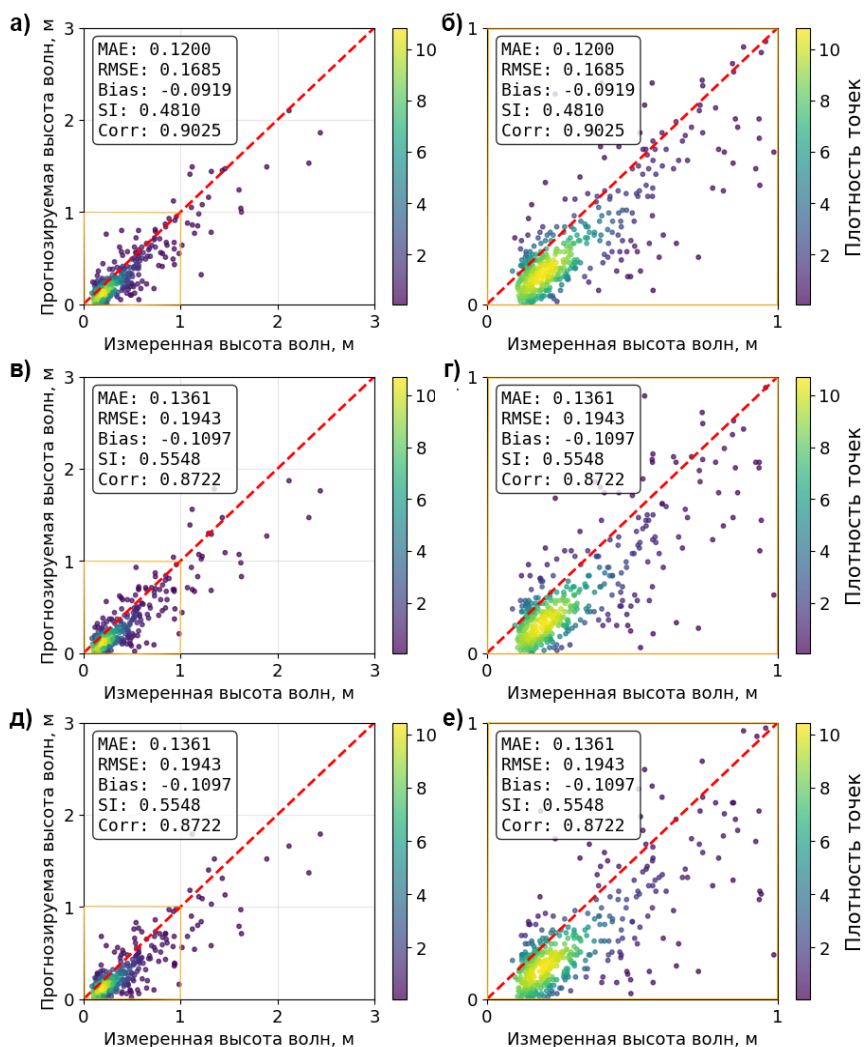


Рис. 4. Плотностные диаграммы рассеяния: для всего диапазона высот (а, в, д); для высот до 1 м (б, г, е). Заблаговременность прогноза: 15 ч (а, б); 39 ч (в, г); 63 ч (д, е).

Fig. 4. Density scatter plots: for the full range of wave heights (а, в, д); for heights up to 1 m (б, г, е). Forecast lead times: 15 h (а, б); 39 h (в, г); 63 h (д, е).

Количественная оценка изменений при переходе заблаговременности от 15 к 63 часам показывает, что абсолютное значение смещения (BIAS) возрастает на 22 %, средняя абсолютная ошибка (MAE) увеличивается на 17 %, индекс рассеяния (SI) – на 15 %, а среднеквадратичная ошибка (RMSE) – на 12 %. При этом корреляция (R) снижается незначительно –

всего на 3 %. Таким образом, для большинства метрик ухудшение не превышает 10–20 %, что подтверждает сохранение моделью удовлетворительной прогностической способности даже на срок около трех суток.

Оценка оправдываемости прогнозов волнения показала, что с увеличением заблаговременности доля верных прогнозов снижается. Для краткосрочного прогноза на 15 часов оправдываемость составила 80.5 %. На сутки (24 часа) этот показатель остается высоким – 77.2 %, а для прогноза на двое суток (48 часов) доля оправдавшихся прогнозов равна 75.4 %.

Для выявления зависимости точности прогнозов от абсолютных значений высоты волн все статистические метрики были отсортированы по высоте волн. На рис. 5 показаны значения MAE, RMSE, SI, BIAS для прогноза на 1 и 2 суток для диапазонов высоты волн с шагом 0.5 м.

Для слабого волнения (0–0.5 м) прогнозы всех заблаговременностей демонстрируют максимальную относительную ошибку: индекс рассеяния (SI) достигает 57–63 %, что свидетельствует о низкой точности прогноза в этом диапазоне. При этом систематическое смещение стабильно составляет около -0.09 м, указывая на постоянную недооценку высоты волн.

Для высоты волн в диапазоне (0.5–1.5 м) наблюдается улучшение показателей: SI снижается до 30–44%. Однако абсолютные ошибки возрастают - MAE увеличивается до 0.20–0.40 м, а систематическая ошибка увеличивается до -0.15 – -0.32 м.

Для высоты волн более 1.5 м модель показывает относительную точность с SI 28–38 % для всех исследуемых заблаговременностей, но RMSE и BIAS возрастают. При высотах свыше 2 метров абсолютная ошибка MAE достигает 0.66–0.83 м, а систематическая ошибка -0.60 – -0.83 м, что означает недооценку фактической высоты волн на 25–35%.

Для заблаговременности 72 часа сохраняются те же тенденции, что и для заблаговременности для 15 часов, но систематическая ошибка для высоты волн более 2 м увеличивается до -0.8 м, а RMSE возрастает до 0.9.

Однако следует отметить, что в имеющейся выборке было всего 17 значений для высоты волн более 2 м, и это были всего три синоптические ситуации. Соответственно, полученный результат не обеспечен статистически. С другой стороны, возможное занижение высоты волн моделью необходимо учитывать при принятии практических решений.

Таким образом, наблюдается существенное занижение прогностической моделью высоких для рассматриваемой акватории волн, что требует отдельной оценки причин этих ошибок и дополнительной калибровки модели.

На следующем этапе работы были выполнены оценки качества прогнозов для разных сезонов года. В данной работе под сезонами понимаются следующие: зима (декабрь–февраль), весна (март–май), лето (июнь–август), осень (сентябрь–ноябрь). Анализ сезонных особенностей прогноза представлен на рис. 6.

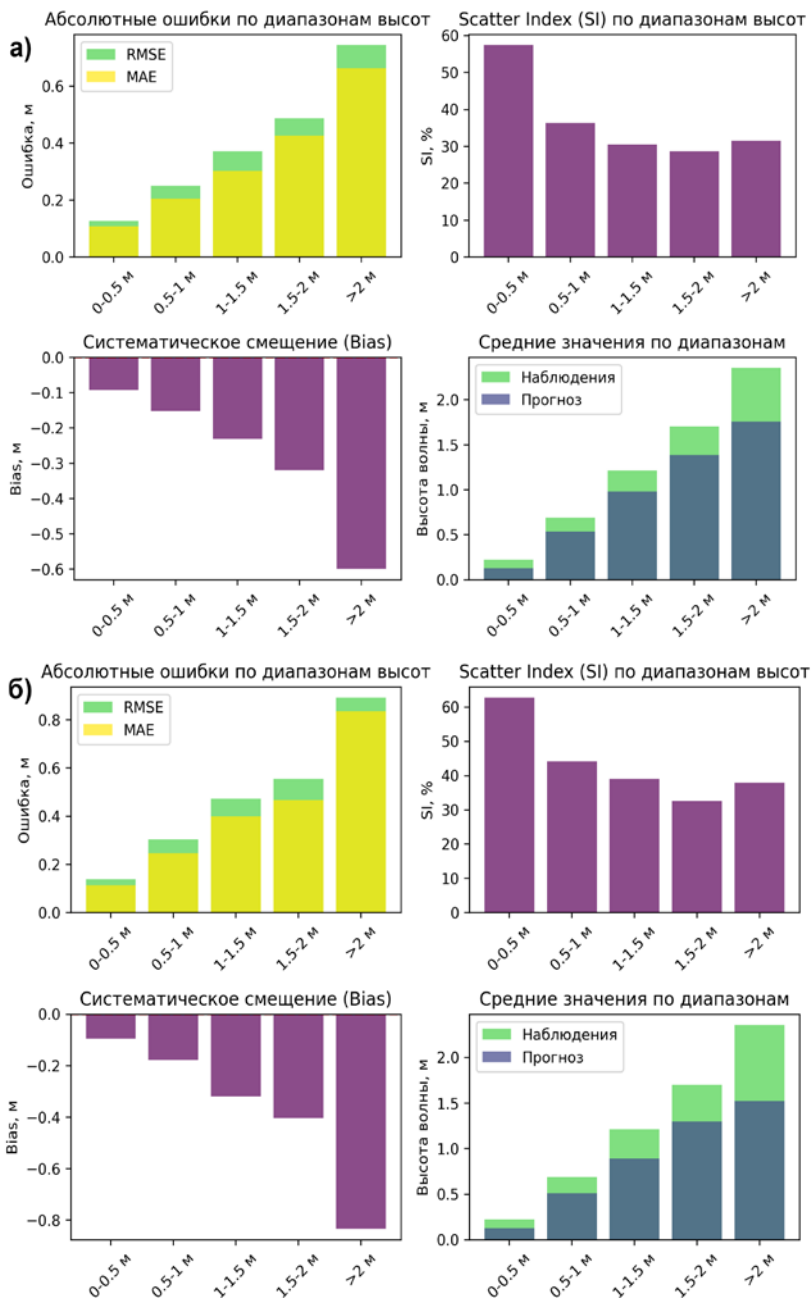


Рис. 5. Статистические параметры в зависимости от высоты волн для заблаговременности: 24 ч (а); 72 ч (б).

Fig. 5. Statistical parameters by wave height for forecast lead times of 24 h (a) and 72 h (б).

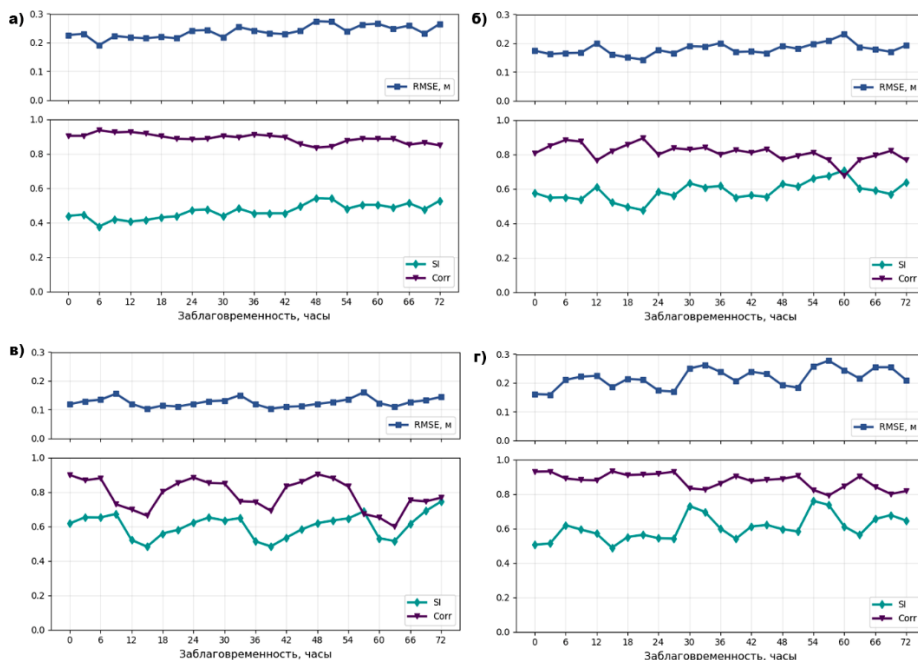


Рис. 6. Анализ сезонных особенностей прогноза: зима (а); весна (б); лето (в); осень (г).

Fig. 6. Analysis of seasonal forecast characteristics: winter (а); spring (б); summer (в); autumn (г).

Зимой модель показывает стабильное качество прогноза с высокой корреляцией (0.83–0.94) и умеренными ошибками (MAE 0.15–0.20 м). При заблаговременности 6 часов ошибки снижаются (MAE 0.15 м, RMSE 0.19 м) при высокой связи с измерениями (R 0.94). Систематическая ошибка находится в диапазоне -0.11 – -0.15 м. Весной точность прогноза уменьшается: корреляция снижается до 0.67–0.89, а относительные ошибки (SI) увеличиваются до 47–71 %. На 60-м часу прогноза наблюдается рост ошибок (SI 0.71) и ослабление связи с наблюдениями (R 0.68). При этом абсолютные ошибки (MAE 0.11–0.15 м) остаются меньше зимних значений, что связано с пониженной средней высотой волн. Летом при относительно небольших абсолютных ошибках (MAE 0.08–0.12 м) наблюдается снижение корреляции (0.6–0.9) и увеличение индекса рассеяния (SI 0.48–0.74). На 63-м часу прогноза фиксируется дальнейшее уменьшение корреляции (R 0.6) при SI 0.52. Осенью точность прогноза варьируется: на 3-м часу ошибки уменьшаются (MAE 0.14 м) при высокой корреляции (R 0.93), а к 57-му часу наблюдается рост ошибок (MAE 0.19 м, SI 0.74). Корреляция сохраняется в пределах 0.79–0.93.

Необходимо отметить, что повышение качества прогнозов для заблаговременности 15 часов, полученное для всей выборки, характерно только

для лета и в меньшей степени для осени. Именно в летний период в рассматриваемой акватории наблюдаются бризы, которые имеют суточную цикличность и могут генерировать в бухте волны с высотой до 0.8 м.

Таким образом, качество прогнозов выше в осенне-зимний период, тогда как в весенне-летний сезон точность существенно снижается, особенно в относительных показателях. Это связано с более качественным прогнозом ветра во время штормовых событий в зимнее время, тогда как в летний период преобладают локальные ветровые эффекты, которые глобальная атмосферная модель воспроизводит хуже. С другой стороны, для практического использования наиболее востребованы прогнозы именно в осенне-зимний период.

Анализ влияния ветровых условий на точность прогноза

Как уже было отмечено, результаты прогноза волнения главным образом зависят от поля скорости ветра, задаваемого в модели (далее форсинг). На рис. 7 показано сопоставление рядов скорости ветра из GFS и полученного автоматической метеостанцией для заблаговременности 15 часов.

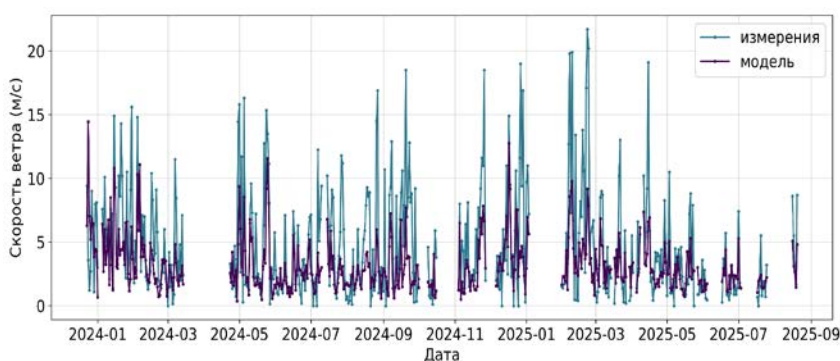


Рис. 7. Скорость ветра по данным измерений и по прогнозу на 15 часов.

Fig. 7. Comparison of measured and 15-hour forecast wind speeds.

Анализ прогнозов скорости ветра GFS показал его удовлетворительное качество с коэффициентом корреляции около 0.7, однако, как и для волн, наблюдается систематическое занижение скорости ветра.

Ввиду особенности положения анализируемой точки (подножие гор, новороссийская бора) было исследовано влияние двух вариантов направления ветра на ошибки прогноза волнения:

1. Ветер с суши (сектор 300–120°): на эту категорию приходится 59.1 % случаев.
2. Ветер с моря (сектор 120–300°): на эту категорию приходится 40.9 % случаев.

На рис. 8 показаны диаграммы рассеяния для высоты волн при разных направлениях ветра (с моря и с суши) для заблаговременности 15 часов.

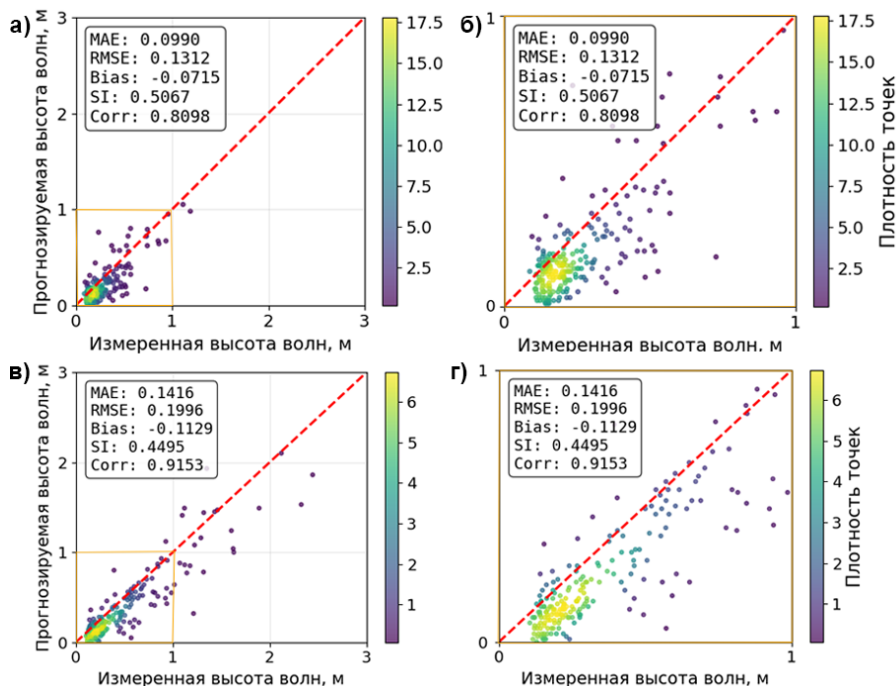


Рис. 8. Плотностные диаграммы рассеяния для высот волн заблаговременностью 15 часов: при ветре с суши (а, б); при ветре с моря (в, г).

Fig. 8. Density scatter plots of wave heights for a 15-hour forecast: with onshore wind (а, б); with offshore wind (в, г).

Сравнительный анализ метрик для различных направлений ветра при заблаговременности прогноза 15 часов демонстрирует существенную зависимость качества прогноза модели от ветровых условий. При ветре с моря модель показывает более высокую корреляцию (0.92 против 0.81) и лучший SI (0.44 против 0.51), что указывает на более точное воспроизведение динамики волнения. Однако в этом режиме наблюдается большее систематическое занижение результатов (BIAS -0.11 против -0.07), что объясняется разницей в высоте волн. При ветре с суши разгон в бухте небольшой. Это приводит к повышенным значениям ошибок MAE (0.14 против 0.1) и RMSE (0.2 против 0.13). Таким образом, модель лучше предсказывает волны, приходящие с моря при соответствующих направлениях ветра.

Обсуждение и заключение

На основе проведенного исследования выполнена комплексная оценка качества прогноза волнения в Цемесской бухте, выполненная с использованием модели WAVEWATCH III и ветрового форсинга GFS. Показано, что система демонстрирует удовлетворительное качество прогнозов во всем исследуемом диапазоне заблаговременности (0–72 часа). Высокое качество прогнозов наблюдается при заблаговременности 15 часов, где

зафиксированы минимальные значения ошибок (MAE 0.12 м, RMSE 0.17 м) и систематической ошибки (-0.09 м) при сохранении высокой корреляции с измерениями (0.9). При увеличении заблаговременности точность прогнозов снижется.

Для слабого волнения (0–0.5 м) наблюдаются максимальные относительные ошибки (SI 57–63 %) при систематической ошибке около -0.09 м. С ростом высоты волн относительная точность улучшается: для волнения (0.5–1.5 м) SI снижается до 30–44 %, а для волнения (>1.5 м) достигает минимальных значений (28–38 %). Однако абсолютные ошибки возрастают с увеличением высоты волн, достигая значений MAE 0.66–0.83 м и смещения -0.6 – -0.83 м для волн высотой более 2 метров.

Сезонный анализ демонстрирует более высокое качество прогнозов в осенне-зимний период с корреляцией 0.79–0.94 и умеренными ошибками. В весенне-летний сезон точность существенно снижается, особенно в относительных показателях, что связано с преобладанием слабого волнения и увеличением доли мезомасштабных процессов в ветровом режиме.

Полученные результаты согласуются с выводами предыдущих исследований, согласно которым ключевым источником ошибок в прогнозе волнения является качество ветрового форсинга. Систематическое занижение скорости ветра моделью GFS закономерно приводит к занижению прогнозируемых высот волн.

Исследование влияния ветровых условий подтвердило определяющую роль качества ветрового форсинга. Более высокая точность прогноза при ветрах с моря по сравнению с ветрами с суши объясняется лучшей воспроизводимостью крупномасштабных синоптических процессов в модели GFS.

Кроме того, в рамках исследования был проведен сравнительный анализ различных подходов к временному агрегированию данных. Помимо основного метода сравнения, основанного на интерполяции измеренных значений на трехчасовые прогностические сроки, выполнялась оценка с использованием часовых осреднений измеренных значений. Данный подход не показал статистически значимого улучшения метрик качества по сравнению с методом интерполяции, что свидетельствует о достаточности стандартной методики сопоставления для оперативной оценки качества прогнозов. Это также подтверждает, что основные источники ошибок связаны с фундаментальными ограничениями модели, а не с методами временного сопоставления данных.

Выявленные закономерности позволяют рекомендовать использование прогнозов с оптимальной заблаговременностью 15 часов для решения практических задач портовой деятельности и судоходства.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего совершенствования системы прогноза, в первую очередь за счет использования региональных атмосферных моделей для задания ветрового форсинга и специальной калибровки параметризаций для экстремальных

высот волн. Выявленные закономерности могут быть использованы для оптимизации оперативного прогнозирования волнения в акватории Цемесской бухты.

Моделирование выполнено С.А. Мысленковым в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121031900090-6). Обработка данных выполнена А.Д. Рыбалко в рамках Госзадания FMWE-2025-0002.

Список литературы

1. *Большая российская энциклопедия*. Цемесская бухта. URL: <https://bigenc.ru/>.
2. Бухановский А.В., Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Типичная ветровая волнения Черного моря по инструментальным данным // *Океанология*. 2000. Т. 40, № 2. С. 289-297.
3. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И. Экстремальные и необычные ветровые волны: измерения, расчет, прогноз // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4, № 4. С. 5-17.
4. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Чернышева Е.С. Подходы, опыт и некоторые результаты исследований волнового климата океанов и морей. II. Расчет волнения по гидродинамическим моделям, режимные распределения и климатические спектры волн // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Науки о Земле. 2005. № 4. С. 56-69.
5. Гавриков А.В., Иванов А.Ю. Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51, № 5. С. 615-615.
6. Гиппиус Ф.Н., Архипкин В.С. Многолетняя изменчивость штормового волнения на Черном море по результатам моделирования // *Вестник Московского университета*. Серия 5. География. 2017. № 1. С. 38-47.
7. Дивинский Б.В., Куклев С.Б. Климатические колебания некоторых волновых параметров на входе в Новороссийскую бухту // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 2. С. 186-193.
8. Евстигнеев В.П. и др. Неопределенность оценки ветроэнергетического потенциала Азово-Черноморской прибрежной зоны вследствие климатических изменений ветрового режима // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 4. С. 22-39.
9. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане // *Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2016. Информационный сборник № 43. С. 133-147.
10. Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // *Труды Государственного океанографического института*. 2014. № 215. С. 90-101.
11. Зеленько А.А., Мысленков С.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зайченко М.Ю. Комплексная система прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России // *Метеорология и гидрология*. 2024. № 8. С. 20-35.
12. Иванов А.Ю. Новороссийская бора: взгляд из космоса // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 2. С. 68-83.
13. Крыленко В.В., Косьян Р.Д., Крыленко М.В. Берега северо-западной части Черноморского побережья Кавказа в начале XXI века // *Океанологические исследования*. 2021. Т. 49, № 1. С. 68-92. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).5.
14. Лопатухин Л.И. Ветро-волновой климат Каспийского моря // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 5. С. 89-97.
15. Мысленков С.А. О влиянии локального ветрового воздействия на высоту волн в Цемесской бухте Черного моря // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. № 7-2 (61). С. 42-47.

16. Мысленков С. А., Шестакова А. А., Торопов П. А. Численное моделирование штормового волнения у северо-восточного побережья Черного моря с использованием различного ветрового форсинга // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 61–71.
17. Мысленков С. А., Столярова Е. В., Архипкин В. С. Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах // Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. Информационный сборник № 44. С. 126-135.
18. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. РД 52.27.759–2011. 201 с.
19. Ратнер Ю.Б., Фомин В.В., Холод А.Л., Иванчик А.М. Модернизированная система оперативного прогноза морского волнения Черноморского центра морских прогнозов // Морской гидрофизический журнал. 2021. № 5 (221). С. 623-640. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-5-623-640
20. Ратнер Ю. Б., Фомин В. В., Иванчик А. М., Иванчик М. В. Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5 (197). С. 56-66. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-5-56-66.
21. Рыбалко А. Д., Мысленков С. А., Архипкин В. С. Анализ пространственно-временной изменчивости спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях // Метеорология и гидрология. 2024. № 12. С. 37-47.
22. Рыбалко А. Д., Мысленков С. А., Архипкин В. С. Использование классификации для анализа сезонной изменчивости спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 24-40.
23. Столярова Е. В., Мысленков С. А. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. № 354. С. 24-35.
24. Торопов П. А., Мысленков С. А., Самсонов Т. Е. Численное моделирование новороссийской боры и связанного с ней ветрового волнения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. № 2. С. 38-46.
25. Akpinar A., Bingölbali B., Van Vledder G. P. Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds // Ocean Engineering. 2016. Vol. 126. P. 276-298.
26. Arkhipkin V.S. et al. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. Vol. 14, no. 11. P. 2883-2897.
27. Bidlot J. R., Holt M. W. Verification of Operational Global and Regional Wave Forecasting Systems against Measurements from Moored Buoys // JCOMM Technical Report. 2006. No. 30. 15 p.
28. Divinsky B. V., Kubryakov A. A., Kosyan R. D. Interannual variability of the wind-wave regime parameters in the Black Sea // Physical Oceanography. 2020. Vol. 27, no. 4. P. 337-351.
29. Efimov V. V., Komarovskaya O. I., Bayankina T. M. Temporal characteristics and synoptic conditions of extreme bora formation in Novorossiysk // Physical Oceanography. 2019. Vol. 26, no. 5. P. 361-373. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-361-373.
30. Myslenkov S., Zelenko A., Resnyanskii Y., Arkhipkin V., Silvestrova K. Quality of the wind wave forecast in the Black Sea including storm wave analysis // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 13099.
31. Ricker M., Behrens A., Staneva J. The operational CMEMS wind wave forecasting system of the Black Sea // Journal of Operational Oceanography. 2024. Vol. 17, no. 3. P. 165-186.
32. WW3DG (The WAVEWATCH III® Development Group). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III® Version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB. College Park, MD, USA, 465 p.

References

1. *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya*. Tsemesskaya bukhta. Available at: <https://bigenc.ru/> [in Russ.].

2. Bukhanovskii A.V., Divinski, B.V., Kos'yan R.D., Lopatukhin L.I., Rozhkov, V.A. Tipizatsiya vetrovogo volneniya Chernogo morya po instrumental'nym dannym. *Okeanologiya [Oceanology]*. 2000, vol. 40, no. 2, pp. 289-297 [in Russ.].
3. Boukhanovsky A.V., Lopatukhin L.I. Extreme and Freak Wind Waves: Measurements, Calculation, Forecast. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika [Fundamental and Applied Hydrophysics]*. 2011, vol. 4, no. 4, pp. 5-17 [in Russ.].
4. Bukhanovskii A.V., Lopatukhin L.I., Chernysheva E.S. Podkhody, opyt i nekotorye rezul'taty issledovaniya volnovogo klimata okeanov i morei. II. Raschet volneniya po gidrodinamicheskim modelyam, rezhimnye raspredeleniya i klimaticheskie spektry voln. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle [Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences]*. 2005, no. 4, pp. 56-69 [in Russ.].
5. Gavrikov A.V., Ivanov A.Y. Anomalously strong bora over the Black sea: observations from Space and Numerical modeling. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2015, vol. 51, no. 5, pp. 546-556.
6. Gippius F.N., Arkhipkin V.S. Interannual variability of storm waves in the Black sea according to numerical modeling results. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography]*. 2017, no. 1, pp. 38-47 [in Russ.].
7. Divinski B.V., Kuklev S.B. Climate Variations of Certain Wave Parameters at the Entrance of the Novorossiysk Bay. *Okeanologiya [Oceanology]*. 2022, vol. 62, no. 2, pp. 186-193 [in Russ.].
8. Evstigneev V.P., Lemesheko N.A., Naumova V.A., Evstigneev M.P. Climate Change Induced Uncertainty of Wind Energy Potential for the Azov and Black Seas Coastal Zone. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*. 2020, no. 4, pp. 22-39 [in Russ.].
9. Zelenko A.A., Resnyanskii Yu.D., Strukov B.S. Rezul'taty ispytaniy sistemy prognozirovaniya vetrovogo volneniya v Mirovom okeane. *Rezul'taty ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. Informatsionnyy sbornik, 2016, no. 43, pp. 133-147 [in Russ.].
10. Zelenko A.A., Strukov B.S., Resnyanskii, Y.D., Martynov S.L. Sistema prognozirovaniya vetrovogo volneniya v Mirovom okeane i moryakh Rossii. *Trudy GOIN [Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute]*. 2014, no. 215, pp. 90-101 [in Russ.].
11. Zelenko A.A., Myslenkov S.A., Resnyanskii Y.D., Strukov B.S., Zaichenko M.Yu. Integrated System for Wind Wave Forecasting in the World Ocean and Russian Seas. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2024, vol. 49, no. 8, pp. 669-680. DOI: 10.3103/S1068373924080028.
12. Ivanov A.Yu. Novorossiyskaya bora: vzglyad iz kosmosa. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*. 2008, no. 2, pp. 68-83 [in Russ.].
13. Krylenko V.V., Kos'yan R.D., Krylenko M.V. The coasts of the Caucasian North-Western part of the Black sea at the beginning of the XXI century. *Okeanologicheskie issledovaniya [Oceanological Research]*. 2021, vol. 49, no. 1, pp. 68-92. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).5 [in Russ.].
14. Lopatukhin L.I. Caspian sea wind and wave climate. *Okeanologicheskie issledovaniya [Oceanological Research]*. 2019, vol. 47, no. 5, pp. 89-97 [in Russ.].
15. Myslenkov S.A. On Effect of Local Wind Influence on Wave Height in Tsemes Bay of the Black Sea. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal]*. 2017, no. 7-2 (61), pp. 42-47 [in Russ.].
16. Myslenkov S.A., Shestakova A.A., Toropov P.A. Numerical simulation of storm waves near the northeastern coast of the Black Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016, vol. 41, no. 10, pp. 706-713. DOI: 10.3103/S106837391610006X.
17. Myslenkov S.A., Stolyarova E.V., Arkhipkin V.S. Sistema prognoza vetrovogo volneniya v Chernom more s detalizatsiei v shelfovykh zonakh. *Rezul'taty ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, Informatsionnyy sbornik no. 44, 2017, pp. 126-135 [in Russ.].
18. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Chast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. RD 52.27.759-2011. Moscow, 2011, 201 p. [in Russ.].
19. Ratner Yu.B., Fomin V.V., Ivanchik A.M., Ivanchik M.V. System of the Wind Wave Operational Forecast by the Black Sea Marine Forecast Center. *Physical Oceanography*. 2021, vol. 28, no. 5, pp. 579-595. DOI: 10.22449/1573-160X-2021-5-579-595

20. Ratner Yu.B., Fomin V.V., Ivanchik A.M., Ivanchik M.V. System of the Wind Wave Operational Forecast by the Black Sea Marine Forecast Center. *Physical Oceanography*. 2017, no. 5, pp. 51-59. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-5-51-59.

21. Rybalko A.D., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S. Analysis of the Spatiotemporal Variability of Wind Wave Frequency Spectra in the Black Sea and the Sea of Azov. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2024, vol. 49, no. 12, pp. 1052-1060. DOI: 10.3103/S1068373924120033

22. Rybalko A.D., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S. Analysis of seasonal variability in wind wave spectra in the Black and Azov seas based on classification. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2024, vol. 391, no. 1, pp. 24-40 [in Russ.].

23. Stoliarova E.V., Myslenkov S.A. High resolution wave forecast system in Kerch strait. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*. 2015, no. 354, pp. 24-35 [in Russ.].

24. Toropov P.A., Myslenkov S.A., Samsonov T.E. Chislennoe modelirovanie novorossiiskoi bory i svyazannogo s nei vetrovogo volneniya. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography]*. 2013, no. 2, pp. 38-46 [in Russ.].

25. Akpinar A., Bingölbali B., Van Vledder G.P. Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds. *Ocean Engineering*. 2016, vol. 126, pp. 276-298.

26. Arkhipkin V.S. et al. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014, vol. 14, no. 11, pp. 2883-2897.

27. Bidlot J.R., Holt M.W. Verification of Operational Global and Regional Wave Forecasting Systems against Measurements from Moored Buoys. *JCOMM Technical Report*. 2006, no. 30, 15 p.

28. Divinsky B.V., Kubryakov A.A., Kosyan R.D. Interannual variability of the wind-wave regime parameters in the Black Sea. *Physical Oceanography*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 337-351.

29. Efimov V.V., Komarovskaya O.I., Bayankina T.M. Temporal characteristics and synoptic conditions of extreme bora formation in Novorossiysk. *Physical Oceanography*. 2019, vol. 26, no. 5, pp. 361-373. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-361-373.

30. Myslenkov S., Zelenko A., Resnyanskii Y., Arkhipkin V., Silvestrova K. Quality of the wind wave forecast in the Black Sea including storm wave analysis. *Sustainability*. 2021, vol. 13, p. 13099.

31. Ricker M., Behrens A., Staneva J. The operational CMEMS wind wave forecasting system of the Black Sea. *Journal of Operational Oceanography*. 2024, vol. 17, no. 3, pp. 165-186.

32. WW3DG (The WAVEWATCH III® Development Group). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III® Version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB. College Park, MD, USA, 465 p.

Поступила 16.10.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 16.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.