

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-72-85>

УДК 551.465

Оценка точности воспроизведения метеорологических характеристик по модели WRF для акватории Каспийского моря

В.В. Фомин^{1,2}, Т.Ю. Выручалкина^{1,3}

¹ Государственный океанографический институт
имени Н.Н. Зубова, г. Москва, Россия;

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

³ Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва, Россия
vladimirfomin@live.com

В работе представлены оценки точности воспроизведения метеорологических характеристик, полученных по негидростатической атмосферной модели WRF, адаптированной к акватории Каспийского моря с пространственным разрешением 6 км. Проведены расчеты метеорологических характеристик с различными параметризациями физических процессов, доступных в модели WRF. Выполнена верификация модели по данным с прибрежных метеорологических станций за 2021 год. Исследование показало, что наилучшие результаты в воспроизведении метеорологических характеристик достигаются с использованием в качестве параметризации микрофизических процессов – Thompson graupel scheme, параметризации конвекции – Tiedtke, параметризации длинноволновой и коротковолновой радиаций – RRTMG, параметризации пограничного слоя – MYJ и параметризации приземного слоя – Noah Land-Surface Model. Анализ результатов расчетов в сравнении с данными наблюдений на метеорологических станциях показал, что модель корректно воспроизводит модуль и направление скорости ветра, температуру воздуха, давление на уровне моря. Получено, что модель корректно воспроизводит не только средние характеристики скорости ветра, но и его наибольшие значения, что может быть особенно важно при моделировании штормовых нагонов и сгонов на акватории Каспийского моря.

Ключевые слова: Каспийское море, региональная модель атмосферной циркуляции, численные методы

Assessing the accuracy of simulation of meteorological characteristics with the WRF model for the Caspian Sea

V.V. Fomin^{1,2}, T.Y. Vyruchalkina^{1,3}

¹ N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow, Russia;

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

³ Water problems institute of Russian academy of sciences, Moscow, Russia
vladimirfomin@live.com

The paper presents the accuracy estimates for the simulation of meteorological characteristics obtained from the WRF model with a spatial resolution of 6 km adapted for the Caspian Sea. It was used to simulate meteorological characteristics using various parameterizations of microphysics processes available in the WRF model. The model was verified using data from coastal weather stations for 2021. It was found that the best results in reproducing meteorological characteristics are achieved using the Thompson graupel scheme as a parameterization of physical processes, the Tiedtke scheme as a parameterization of convection, the RRTMG scheme as a parameterization of long-wave and short-wave radiation, the MYJ scheme as a boundary layer parameterization, and the Noah Land-Surface Model as a surface layer parameterization. An analysis of the simulation results versus observational data from weather stations showed that the model correctly reproduces the modulus and direction of wind speed, air temperature, and sea-level pressure. It was found that the model correctly reproduces not only the average characteristics of wind speed, but also its extreme values, which is especially important when modeling storm surges in the Caspian Sea.

Keywords: Caspian Sea, regional nonhydrostatic atmosphere circulation model, numerical methods

Введение

Решение актуальных задач, направленных на исследование морской циркуляции, планирование и проведение морских операций, предупреждение о чрезвычайных ситуациях, требует привлечения наиболее современных методов исследования гидрометеорологических процессов. К ним в том числе относятся и численные методы моделирования гидрометеорологических характеристик. Развитие вычислительной техники позволяет использовать наиболее полные численные модели атмосферной циркуляции, реализованные с высоким пространственным разрешением и позволяющие рассчитывать детализированные поля метеорологических характеристик.

В настоящей работе рассматривается реализация региональной модели атмосферной циркуляции WRF [19] для акватории Каспийского моря. Исследования атмосферной циркуляции над акваторией Каспийского моря проводятся различными коллективами. Так, в [4] исследуется возможность моделирования осадков с использованием модели WRF различного пространственного разрешения (от 30 до 3.3 км). В [9] представлены результаты моделирования полей ветра над акваторией Каспийского моря с пространственным разрешением 10 км. В [8] анализируется влияние параметризаций микрофизических процессов, доступных в модели WRF, на воспроизведение такого погодного явления, как «lake effect snow», при котором вода, испаряющаяся в холодное время года с поверхности моря или озера, превращается в облака и выпадает в виде снега. В [3] представлена апробация системы оперативного диагноза и прогноза (СОДиП) для краткосрочного прогноза гидрометеорологических характеристик, в которой для прогноза метеорологических характеристик используется модель WRF с пространственным разрешением 7 км. Модель

WRF используется также и в региональных системах совместного моделирования океан – атмосфера [5]. В [16] результаты расчетов по модели WRF используются для воспроизведения морских течений в южном Каспии при бризовых ветрах.

Таким образом, можно отметить, что модель WRF может использоваться как для изучения физических процессов над акваторией Каспийского моря, так и при решении практических задач по созданию реанализа метеорологических характеристик или для краткосрочных прогнозов метеорологических характеристик. Атмосферное воздействие, рассчитываемое по модели WRF или аналогичной ей региональной негидростатической модели COSMO, может быть использовано для расчета потоков импульса, тепла и пресной воды при воспроизведении параметров морской циркуляции [1, 3]. В [2] показано, что использование данных атмосферного воздействия, рассчитываемых по региональным негидростатическим моделям атмосферной циркуляции, позволяет повысить точность расчета гидрологических характеристик, в том числе и в период прохождения штормовых ситуаций.

Целью настоящей работы является адаптация модели WRF для акватории Каспийского моря с высоким пространственным разрешением. Для решения этой задачи проведена адаптация модели WRF для акватории Каспийского моря, выполнены расчеты метеорологических характеристик с использованием различных параметризаций физических процессов, доступных в модели WRF. Выполнен анализ чувствительности результатов расчетов при использовании различных параметризаций физических процессов, а также оценка точности на основе сравнения результатов измерений с данными с прибрежных гидрологических станций.

Материалы и методы исследования

Модель WRF (Weather Research and Forecasting Model) [19] для акватории Каспийского моря была адаптирована с пространственным разрешением 6 км в проекции Ламберта. Количество точек по долготе и широте составило 199×399. По вертикали задавалось 42 вертикальных горизонта. Расчетная область модели представлена на рис. 1. Сеточная область модели превышает акваторию Каспийского моря в его морских границах на 250–300 км во всех направлениях. Это сделано с целью уменьшения влияния граничных условий на атмосферные характеристики над морской поверхностью и в прибрежной зоне.

В качестве входной гидрометеорологической информации, необходимой для формирования начальных и граничных условий, были использованы данные глобального реанализа ERA5 [10], предоставляемые с пространственным разрешением 0.25×0.25°. Данные о подстилающей поверхности взяты из архива MODIS с пространственным разрешением 2'.

Верификация модели проводилась по данным прибрежных метеорологических станций, расположение которых представлено на рис. 1. Верификация проводилась для периода с 1 января по 31 декабря 2021 г. для температуры воздуха, скорости ветра, его зональной и меридиональной компонент и для давления над уровнем моря. С учетом пропусков в данных верификация проводилась для данных с временной дискретностью в 12 часов.

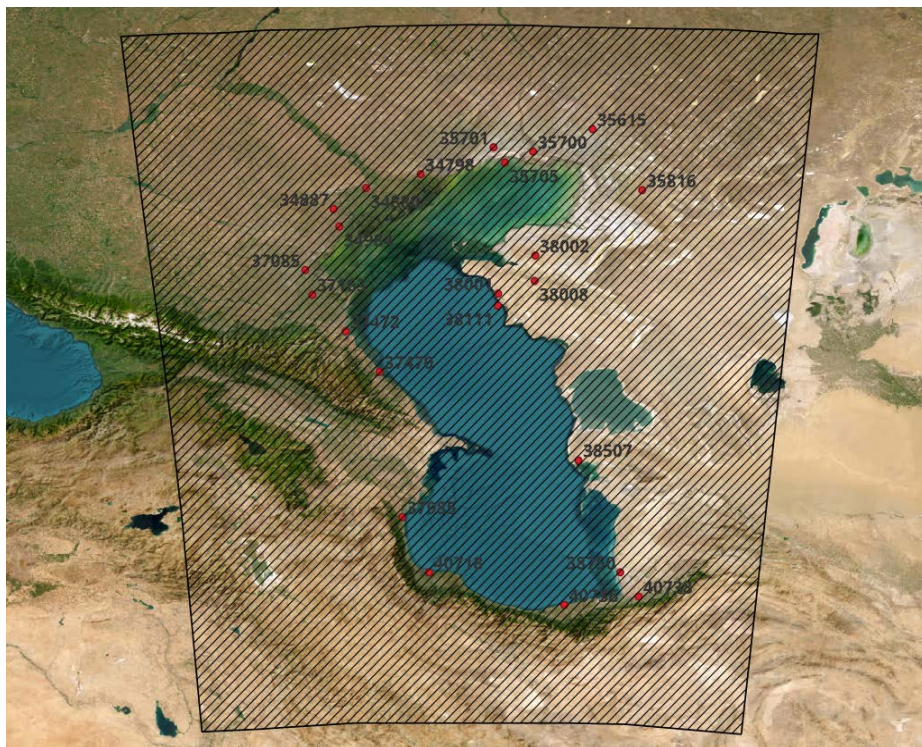


Рис. 1. Область моделирования по модели WRF и расположение метеостанций, выбранных для проведения верификации по модели WRF.
Fig. 1. WRF model area and location of weather stations selected for WRF model verification.

Для оценки точности воспроизведения метеорологических характеристик рассчитывались среднеквадратичное отклонение (RMSE) и коэффициент корреляции (R_c).

В рамках исследования были рассмотрены различные параметризации с целью определения оптимальной конфигурации модели WRF. Выбор параметризаций был основан на собственном опыте авторов работы [3], а также на основе результатов анализа работ [4, 8, 9]. В табл. 1 представлены три выбранные конфигурации модели WRF.

Таблица 1. Варианты конфигурации модели WRF**Table 1.** WRF model configuration

Тип параметризации	E01	E02	E03
Параметризация микрофизических процессов	Thompson graupel scheme [21]	Lin scheme [15]	WSM 6 class [11]
Параметризация конвекции	Tiedtke [22]	Kain-Fritsch Eta [7]	Kain-Fritsch Eta [7]
Параметризация длинноволновой радиации	RRTMG [13]	RRTM [17]	RRTM [17]
Параметризация коротковолновой радиации	RRTMG [13]	Goddard [6]	Goddard [6]
Параметризация пограничного слоя	MYJ [14]	MRF Hong and Pan [12]	MYNN 2.5 level TKE scheme [18]
Параметризация приземного слоя	Noah Land-Surface Model [20]	Noah Land-Surface Model [20]	Noah Land-Surface Model [20]

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 представлены средние по всем станциям значения коэффициента корреляции и среднеквадратичной ошибки расчетов параметров для трех выбранных конфигураций модели WRF (эксперименты E01, E02, E03).

Таблица 2. Средние значения коэффициента корреляции (R_c) и среднеквадратичной ошибки (RMSE) для модуля скорости ветра (SPD), его зональной (U10) и меридиональной компонент (V10), температуры воздуха (TEMP) и давления (SLP) для экспериментов E01, E02, E03

Table 2. Mean values of correlation coefficient (R_c) and root mean square error (RMSE) for wind speed (SPD), its zonal (U10) and meridional components (V10), air temperature (TEMP) and pressure (SLP) for experiments E01, E02, E03

Эксперимент	SPD		TEMP		Slp		U10		V10	
	R_c	RMSE	R_c	RMSE	R_c	RMSE	R_c	RMSE	R_c	RMSE
E01	0.78	1.05	0.98	1.42	0.99	0.88	0.87	1.20	0.79	1.19
E02	0.77	1.06	0.98	1.43	0.99	0.88	0.86	1.21	0.78	1.22
E03	0.76	1.09	0.98	1.43	0.99	0.87	0.86	1.23	0.76	1.28

Как видно в табл. 2, точность результатов расчетов при использовании каждой из выбранных параметризаций незначительно отличается. При этом расчеты метеорологических полей по эксперименту E01 показали

более точные результаты по всем параметрам. В среднем коэффициент корреляции для скорости ветра, зональной и меридиональной его компонент на 0.01 выше по отношению к эксперименту E02 и на 0.02–0.03 выше по отношению к эксперименту E03. Коэффициент корреляции при воспроизведении давления на уровне моря и температуры воздуха одинаков для всех трех экспериментов. Значения среднеквадратичной ошибки на 0.01–0.03 ниже в эксперименте E01 по отношению к эксперименту E02 и на 0.01–0.09 ниже по отношению к эксперименту E03.

Далее рассмотрим точность воспроизведения метеорологических характеристик на отдельных станциях, рассчитанных по модели WRF в конфигурации E01.

На рис. 2–3 в качестве примеров приведены реализации температуры воздуха, модуля скорости ветра, зональной и меридиональной компонент скоростей ветра, давления над уровнем моря, полученные по результатам расчетов по модели WRF для точек расположения метеостанций, а также полученные по данным измерений на этих станциях.

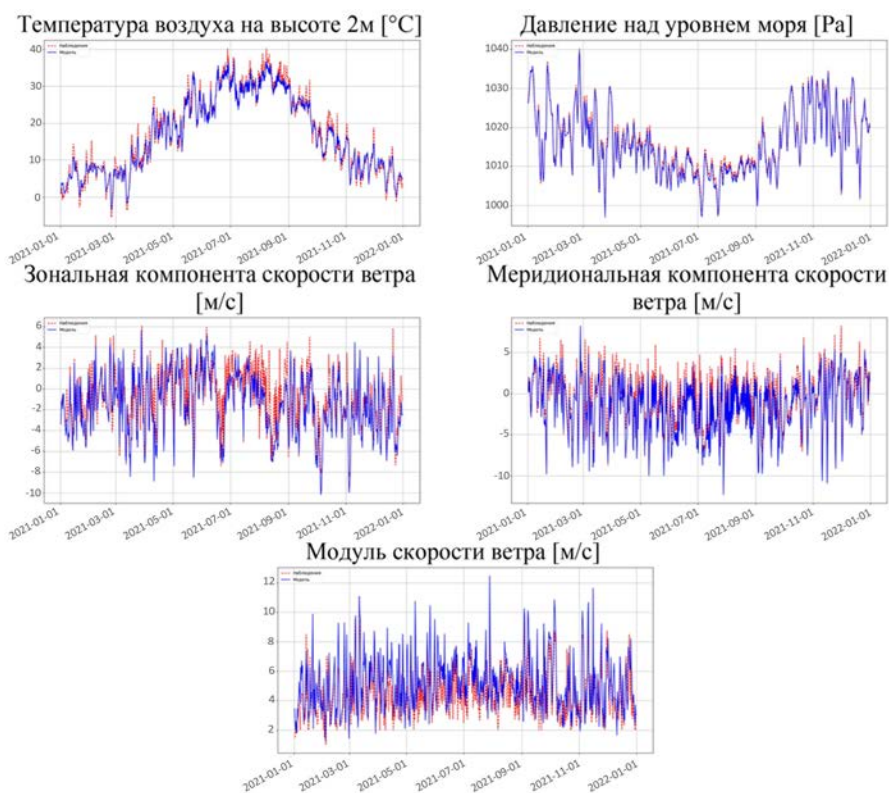


Рис. 2. Сравнение реализаций метеорологических характеристик по результатам моделирования по модели WRF и по данным измерений на станции 38507.

Fig. 2. Comparison of realizations of meteorological characteristics based on the results of WRF model simulations and on data of measurements at station 38507.

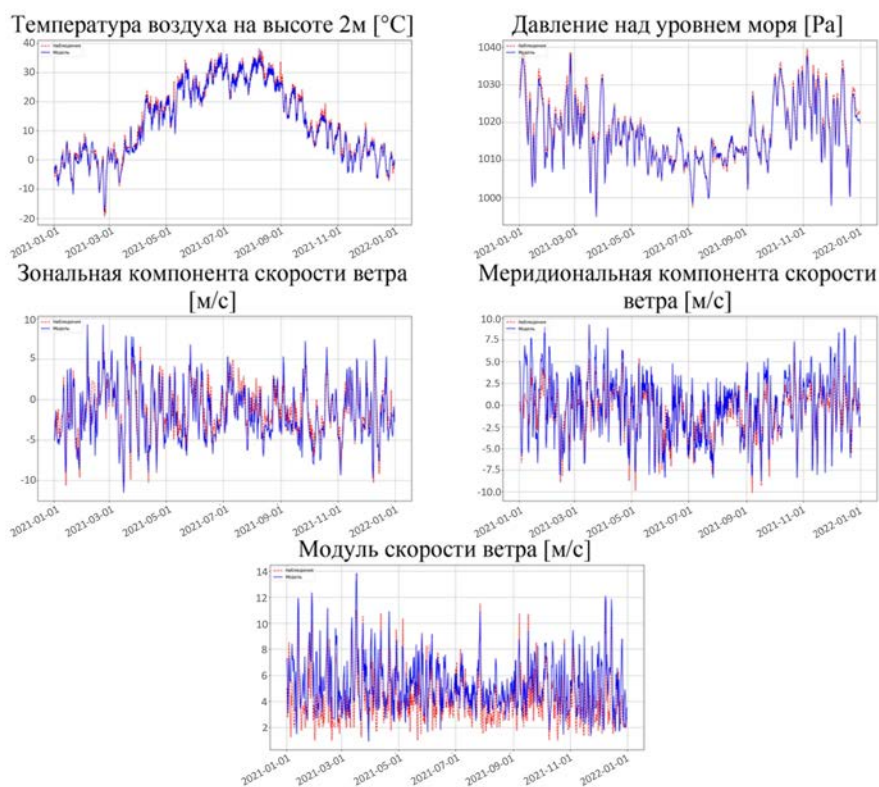


Рис. 3. Сравнение реализаций метеорологических характеристик по результатам моделирования по модели WRF и по данным измерений на станции 38008.

Fig. 3. Comparison of realizations of meteorological characteristics based on the results of WRF model simulations and on data of measurements at station 38008.

В табл. 3 представлены значения коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения результатов расчетов от станционных данных.

Результаты расчетов, представленные в табл. 3 и на рис. 2–3 показывают хорошую точность в воспроизведении метеорологических характеристик и подтверждают возможность воспроизведения моделью реальной атмосферной циркуляции над акваторией Каспийского моря. Результаты верификации показывают, коэффициент корреляции для температуры воздуха изменяется от 0.96 до 0.99, в среднем составляет 0.98. Здесь необходимо отметить, что коэффициент корреляции рассчитывался с учетом годового хода. Среднеквадратичная ошибка в результатах расчета температуры воздуха изменяется от 1.22 до 1.71 °С и в среднем составляет 1.42 °С. Анализ графиков изменения температуры воздуха по результатам

моделирования и данным измерений показывает, что модель качественно воспроизводит изменчивость температуры над акваторией Каспийского моря.

Таблица 3. Значения коэффициента корреляции (Rc) и среднеквадратичной ошибки для модуля скорости ветра (SPD), его зональной (U10) и меридиональной компонент (V10), температуры воздуха (TEMP) и давления на уровне моря (SLP), полученных по результатам расчетов и данным измерений

Table 3. Correlation coefficient (Rc) and root mean square error for wind speed (SPD), its zonal (U10) and meridional components (V10), air temperature (TEMP) and sea level pressure (SLP) obtained from simulations and measurement data

№ станции	SPD		TEMP		Slp		U10		V10	
	Rc	RMSE	Rc	RMSE	Rc	RMSE	Rc	RMSE	Rc	RMSE
38008	0.79	1.13	0.99	1.42	0.99	1.09	0.90	1.24	0.85	1.42
38002	0.76	1.13	0.98	1.67	0.99	1.06	0.91	1.24	0.82	1.23
38507	0.77	1.09	0.99	1.39	0.99	0.87	0.84	1.26	0.90	1.21
38111	0.87	1.16	0.98	1.71	0.99	0.78	0.93	1.41	0.94	1.34
35816	0.89	0.96	0.98	1.59	0.99	0.97	0.94	1.11	0.92	1.11
35615	0.91	1.03	0.99	1.53	0.99	0.71	0.95	1.30	0.90	1.17
37472	0.85	1.10	0.99	1.22	0.99	0.78	0.91	1.34	0.91	1.17
34887	0.73	1.07	0.97	1.46	0.99	0.85	0.93	1.13	0.83	1.08
37985	0.56	0.88	0.98	1.23	0.99	0.78	0.63	0.99	0.78	1.09
37085	0.80	1.15	0.98	1.55	0.99	0.90	0.92	1.23	0.73	1.13
37163	0.90	1.04	0.98	1.35	0.99	0.83	0.91	1.25	0.77	1.09
35701	0.87	0.91	0.98	1.49	0.99	0.77	0.97	0.95	0.89	1.13
34798	0.85	1.05	0.99	1.32	0.99	0.96	0.94	1.08	0.85	1.14
38750	0.74	0.98	0.98	1.35	0.99	0.99	0.81	1.21	0.63	1.10
35700	0.86	1.08	0.99	1.30	0.99	0.79	0.95	1.09	0.90	1.16
35705	0.83	1.19	0.98	1.51	0.99	0.92	0.92	1.45	0.84	1.42
40718	0.75	0.92	0.98	1.25	0.99	0.86	0.74	1.05	0.79	0.99
38001	0.79	1.25	0.98	1.54	0.99	0.94	0.84	1.40	0.82	1.40
34984	0.89	0.89	0.99	1.22	0.99	0.73	0.96	1.02	0.76	1.16
34880	0.81	0.91	0.97	1.35	0.99	0.77	0.91	1.16	0.59	1.27
37470	0.72	1.09	0.96	1.43	0.99	0.90	0.80	1.07	0.86	1.30
40738	0.58	1.10	0.96	1.62	0.99	1.01	0.74	1.38	0.58	1.09
40736	0.49	1.01	0.98	1.27	0.99	1.08	0.62	1.25	0.39	1.29
Мин	0.49	0.88	0.96	1.22	0.99	0.71	0.62	0.95	0.39	0.99
Среднее	0.78	1.05	0.98	1.42	0.99	0.88	0.87	1.20	0.79	1.19
Макс	0.91	1.25	0.99	1.71	0.99	1.09	0.97	1.45	0.94	1.42

Коэффициент корреляции для модуля скорости ветра для представленных станций изменяется от 0.49 до 0.91 и в среднем составляет 0.78, что является достаточно высоким показателем. Среднеквадратичная ошибка изменяется от 0.88 м/с до 1.25 м/с и в среднем составляет 1.05 м/с. Анализ графиков показывает, что результаты моделирования соответствуют данным наблюдений и модель хорошо воспроизводит как средние

характеристики модуля скорости ветра, так и значения скорости ветра в периоды его интенсификации и возникновения штормовых ситуаций, что может быть особенно важно при моделировании ветровых нагонов и для воспроизведения дрейфовой компоненты скорости течений.

Коэффициент корреляции для зональной компоненты скорости ветра изменяется от 0.62 до 0.97 и в среднем составляет 0.87. Коэффициент корреляции для меридиональной компоненты скорости ветра изменяется от 0.39 до 0.94 и в среднем составляет 0.79. Среднеквадратичная ошибка в среднем по всем станциям составляет 1.2 м/с и 1.19 м/с для зональной и меридиональной компонент соответственно. Отметим, что минимальное значение коэффициента корреляции для модуля скорости ветра и его меридиональной компоненты получено для станции 40736, расположенной в южной части Каспийского моря. Вероятнее всего, указанное занижение может быть вызвано двумя причинами: гористой местностью в южной части Каспийского моря и локальным расположением станции, при котором модель WRF недостаточно точно учитывает орографию в районе ее расположения. Также заниженные значения могут быть вызваны экранированием станции для отдельных направлений ветра с учетом ее расположения. Учитывая, что на остальных станциях наблюдаются высокие значения коэффициента корреляции и незначительные значения среднеквадратичной ошибки, можно говорить, что модель корректно воспроизводит скорость и направление ветра в целом по бассейну Каспийского моря.

Анализ приведенных графиков для компонент скорости ветра также показывает соответствие результатов измерений с данными моделирования. Это говорит о том, что корректно воспроизводится не только модуль скорости ветра, но также и его направление. Анализируя результаты верификации по характеристике давления над уровнем моря, необходимо отметить, что давление является интегральной характеристикой и воспроизводится всегда достаточно успешно. Результаты верификации показывают, коэффициент корреляции составляет 0.99. Среднеквадратичная ошибка изменяется от 0.71 до 1.09 гПа. Визуальный анализ графиков сравнения также показывает высокое соответствие результатов моделирования с данными наблюдений.

Таким образом, по результатам комплексного сравнения данных измерений с результатами моделирования метеорологических характеристик по модели WRF с горизонтальным разрешением 6 км необходимо отметить хорошее соответствие результатов моделирования с данными измерений. Анализ модуля и направления скорости ветра показал, что модель хорошо воспроизводит не только средние характеристики скорости ветра, но и его наибольшие значения, что особенно важно при моделировании штормовых нагонов и сгонов на акватории Каспийского моря.

С использованием модели WRF в конфигурации E01 были проведены расчеты атмосферных характеристик с 1970 по 2021 год. На рис. 4–5

представлены примеры результатов расчетов скорости ветра на акватории Каспийского моря для 1971 и 2021 гг., а также температуры воздуха на высоте 2 м. На основе полученных результатов планируется создание базы данных метеорологических характеристик Каспийского моря. Она будет использоваться в дальнейших работах для комплексного исследования гидрометеорологических процессов на акватории Каспийского моря.

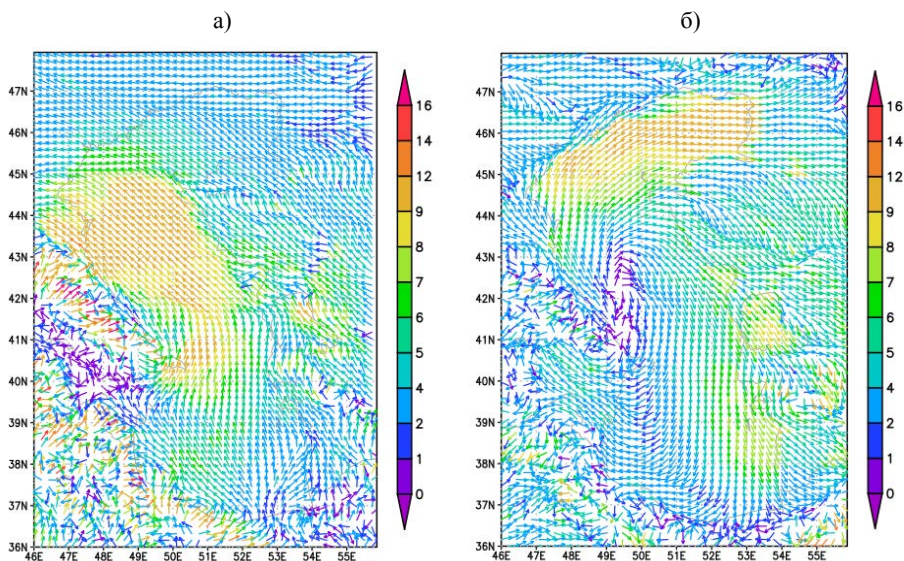


Рис. 4. Скорость и направление ветра на высоте 10 м: 05 ч 11 марта 1971 г. (а); 17 ч 8 июня 2021 г. (б).

Fig. 4. Wind speed and direction at 10 m height: 05 h 11 March 1971 (а); 17 h 8 June 2021 (б).

Выводы

В работе представлена реализация модели WRF для акватории Каспийского моря с пространственным разрешением 6 км. В качестве входной метеорологической информации используются данные глобального реанализа ERA5.

Рассмотрены различные конфигурации модели. Получено, что с использованием в качестве параметризации микрофизических процессов – Thompson graupel scheme, параметризации конвекции – Tiedtke, параметризаций длинноволновой и коротковолновой радиаций – RRTMG, параметризации пограничного слоя – MYJ, параметризации приземного слоя – Noah Land-Surface Model наблюдаются наилучшие результаты в воспроизведении метеорологических характеристик. Оценки точности

получены по результатам сравнения данных моделирования с данными наблюдений на прибрежных метеорологических станциях.

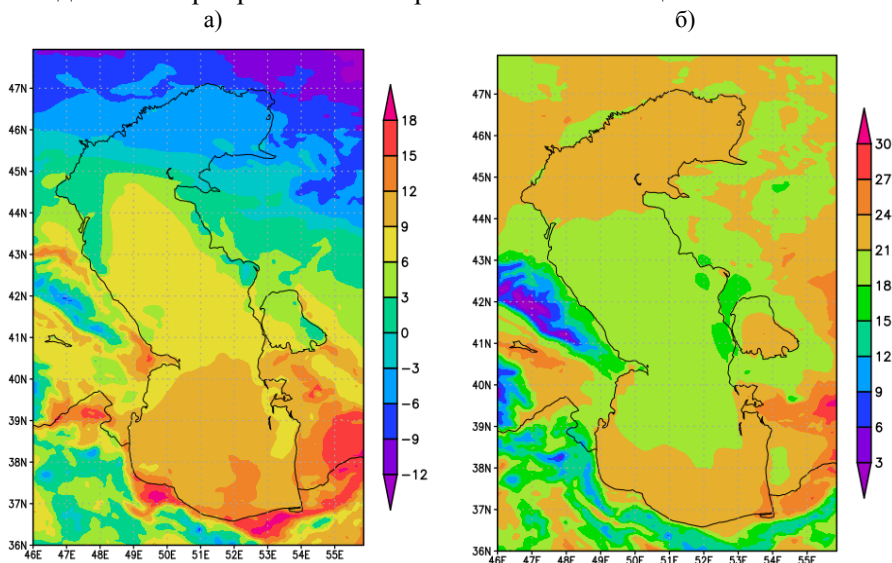


Рис. 5. Температура воздуха на высоте 2 м: 05 ч 11 марта 1971 г. (а); 17 ч 8 июня 2021 г. (б).

Fig. 5. Air temperature at 2 m height: 05 h 11 March 1971 (а); 17 h 8 June 2021 (б).

По результатам комплексного сравнения данных измерений с результатами моделирования метеорологических характеристик по модели WRF с горизонтальным разрешением 6 км получено хорошее соответствие результатов моделирования с данными измерений. Анализ модуля и направления скорости ветра показал, что модель хорошо воспроизводит не только средние характеристики скорости ветра, но и его наибольшие значения, что особенно важно при моделировании штормовых нагонов и сгонов на акватории Каспийского моря. При этом отмечено, что несколько худшие результаты наблюдаются для станций, расположенных в южной части Каспийского моря, что вероятнее всего вызвано двумя причинами: гористой местностью в южной части Каспийского моря и расположением станций, при котором модель WRF недостаточно точно учитывает топографию местности. Для более точного воспроизведения локальных особенностей полей ветра в указанных регионах требуется реализация модели WRF более высокого пространственного разрешения.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ № 22-27-00800.

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No22-27-00800.

Список литературы

1. *Нестеров Е.С., Попов С.К., Лобов А.Л.* Статистика и моделирование штормовых нагонов в Северном Каспии // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 10. С. 53-59.

2. *Фомин В.В., Дианский Н.А.* Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 12. С. 69-80.

3. *Фомин В.В., Дианский Н.А., Коршенко Е.А., Выручалкина Т.Ю.* Система оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических характеристик Каспийского моря и оценка точности прогнозов по данным натурных измерений // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 9. С. 49-64.

4. *Шестакова А.А., Торопов П.А.* Моделирование экстремальных осадков зимнего периода для южного побережья Каспийского моря // *Вестник Московского Университета. Серия 5. География*. 2019. № 6. С. 51-59.

5. *Bruneau N., Toumi R.* A fully-coupled atmosphere-ocean-wave model of the Caspian Sea // *Ocean Modelling*. 2016. Vol. 107. P. 97-111. DOI: 10.1016/j.ocemod.2016.10.006

6. *Chou M.-D., Suarez M.J.* An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models // *NASA Techn. Memo*. 104606, vol. 3. 1994. 85 p.

7. *Fritsch J.M., Chappel C.F.* Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization // *J. Atmos. Sci.* 1980. Vol. 37, no.8. P. 1722-1733. DOI: 10.1175/1520-0469(1980)037<1722:NPOCDM>2.0.CO;2

8. *Ghanaian P.* Impact of physical parameterizations on simulation of the Caspian Sea lake-effect snow // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2021. Vol. 94. P. 101219. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2021.101219.

9. *Ghader S., Namin M., Chegini F., Bohluly A.* Hindcast of Surface Wind Field Over the Caspian Sea Using WRF Model // *The 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS)*. 2014. P. 40-43.

10. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Q J R Meteorol Soc.* 2020. Vol. 146. P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

11. *Hong S., Lim J-O J.* The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) // *J. Korean Met. Society*. 2006. Vol. 42. P. 129-151.

12. *Hong S-Y., Pan H-L.* Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium-Range Forecast model // *Mon. Wea. Rev.* 1996. 124. P. 2322-2339. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2

13. *Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D.* Radiative forcing by longlived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2008. Vol. 113. P. D13103. DOI: 10.1029/2008JD009944

14. *Janjic Z.I.* The step-mountain coordinate: physical package // *Mon. Wea. Rev.* 1990. Vol. 118, no.7. P. 1429-1443. DOI: 10.1175/1520-0493(1990)118<1429:TSMCPP>2.0.CO;2

15. *Lin Y.-L., Farley R.D. and Orville H.D.* Bulk parameterization of the snow field in a cloud model // *J. Clim. Appl. Meteor.* 1983. Vol. 22, no. 6. P. 1065-1092. DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2

16. *Masoud M., Pawlowicz R.* Currents generated by the sea breeze in the southern Caspian Sea // *Ocean Sci.* 2022. Vol. 18. P. 675-692. DOI: 10.5194/os-18-675-2022.

17. *Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A.* Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102 (D14). P. 16663-16682. DOI: 10.1029/97JD00237.

19. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., ... Powers J.G.* A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // No. NCAR/TN-475+STR. University Corporation for Atmospheric Research. 2008. DOI:10.5065/D68S4MVH.

20. *Sridhar V., Elliot R.L., Chen F. and Brotzge J.D.* Validation of the NOAA-OSU land surface model using surface flux measurements in Oklahoma // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. D20. P. 4418. DOI:10.1029/2001JD001306.

21. *Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // *Mon. Wea. Rev.* 2004. Vol. 132, no.2. P. 519-542. DOI: 10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2

22. *Zhang C., Wang Y.* Why is the simulated climatology of tropical cyclones so sensitive to the choice of cumulus parameterization scheme in the WRF model // *Clim. Dyn.* 2018. Vol. 51. P. 3613-3633. DOI: 10.1007/s00382-018-4099-1

18. *Nakanishi M., Niino H.* Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer // *J. Meteor. Soc. Japan.* 2009. Vol. 87. P. 895-912. DOI: 10.2151/jmsj.87.895

References

1. *Nesterov E.S., Popov S.K., Lobov A.L.* Statistical characteristics and modelling of storm surges in the North Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 10, pp. 664-669. DOI: 10.3103/S1068373918100059.

2. *Fomin V.V., Diansky N.A.* Simulation of extreme surges in the Taganrog Bay with the atmosphere and ocean circulation models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 12, pp. 843-851. DOI: 10.3103/S1068373918120051.

3. *Fomin V.V., Diansky N.A., Korshenko E.A., Vyruchalkina T.Y.* The marine hindcast and forecast system for diagnosis and prediction of hydrometeorological characteristics of the Caspian Sea and forecast verification based on field measurements. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 9, pp. 639-649. DOI: 10.3103/S1068373920090058.

4. *Shestakova A.A., Toropov P.A.* Modeling of extreme winter precipitation for the southern coast of the Caspian Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2019, no. 6, pp. 51-59 [in Russ.].

5. *Bruneau N., Toumi R.* A fully-coupled atmosphere-ocean-wave model of the Caspian Sea. *Ocean Modelling.*, 2016, vol. 107, pp. 97-111. DOI: 10.1016/j.ocemod.2016.10.006

6. *Chou M.-D., Suarez M.J.* An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *NASA Techn. Memo. 104606*, vol. 3. 1994. 85 p.

7. *Fritsch J.M., Chappel C.F.* Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 1980, vol. 37, no. 8, pp. 1722-1733. DOI: 10.1175/1520-0469(1980)037<1722:NPOCDM>2.0.CO;2

8. Ghanaian P. Impact of physical parameterizations on simulation of the Caspian Sea lake-effect snow. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2021, vol. 94, pp. 101219. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2021.101219.
9. Ghader S., Namin M., Chegini F., Bohluly A. Hindcast of Surface Wind Field Over the Caspian Sea Using WRF Model. The 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS). 2014, pp. 40-43.
10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. *Q J R Meteorol Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
11. Hong S., Lim J-O J. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Met. Society*, 2006, vol. 42, pp. 129-151.
12. Hong S-Y., Pan H-L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium-Range Forecast model // *Mon. Wea. Rev.* 1996. 124. P. 2322–2339. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2
13. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by longlived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 2008, vol. 113, P. D13103. DOI: 10.1029/2008JD009944
14. Janjic Z.I. The step-mountain coordinate: physical package. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, vol. 118, no.7, pp.1429-1443. DOI: 10.1175/1520-0493(1990)118<1429:TSMCPP>2.0.CO;2
15. Lin Y.-L., Farley R.D. and Orville H.D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 1983, vol. 22, no. 6, pp. 1065-1092. DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2
16. Masoud M., Pawlowicz R. Currents generated by the sea breeze in the southern Caspian Sea. *Ocean Sci.*, 2022, vol. 18, pp. 675-692. DOI: 10.5194/os-18-675-2022.
17. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave. *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102 (D14), pp. 16663-16682. DOI: 10.1029/97JD00237.
18. Nakanishi M., Niino H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 2009, vol. 87, pp. 895-912. DOI: 10.2151/jmsj.87.895
19. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., ... Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. No. NCAR/TN-475+STR. University Corporation for Atmospheric Research. 2008. DOI:10.5065/D68S4MVH
20. Sridhar V., Elliot R.L., Chen F., Brotzge J.D. Validation of the NOAA-OSU land surface model using surface flux measurements in Oklahoma. *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, no. D20, pp. 4418. DOI:10.1029/2001JD001306.
21. Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, vol. 132, no. 2, pp. 519-542. DOI: 10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2
22. Zhang C., Wang Y. Why is the simulated climatology of tropical cyclones so sensitive to the choice of cumulus parameterization scheme in the WRF model. *Clim. Dyn.*, 2018, vol. 51, pp. 3613-3633. DOI: 10.1007/s00382-018-4099-1

Поступила 04.08.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;

принята в печать 12.12.2023.

Submitted 04.08.2023; approved after reviewing 23.11.2023;

accepted for publication 12.12.2023.