

Фомин В.В.¹, Дианский Н.А.^{1,2,3}, Выручалкина Т.Ю.⁴

АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА АКВАТОРИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

АННОТАЦИЯ

В работе представлено развитие системы оперативного диагноза и прогноза (СОДИП) гидрометеорологических характеристик Каспийского моря. Она включает в себя расчет атмосферного воздействия по региональной негидростатической атмосферной модели Weather Research and Forecasting model (WRF), расчет течений, уровня, температуры, солёности моря и морского льда по модели морской циркуляции INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model) и расчет параметров волнения по Российской атмосферно-волновой модели (РАВМ). Представлены результаты верификации расчетных гидрометеохарактеристик, полученных с помощью СОДИП при проведении ретроспективных и прогностических расчетов. Верификация региональной негидростатической атмосферной модели WRF выполнялась с использованием данных с прибрежных метеостанций. По результатам ретроспективных расчетов проводилась оценка качества воспроизведения метеорологических характеристик с учетом их синоптической и сезонной изменчивости. Было показано, что увеличение пространственного разрешения приводит к улучшению в воспроизведении метеорологических характеристик. По результатам прогностических расчетов проводилась оценка качества воспроизведения метеорологических характеристик в зависимости от заблаговременности прогноза. Верификация модели INMOM выполнялась по данным с гидрологических постов, а также по оценке качества воспроизведения годовой изменчивости уровня моря. Показано, что изменения, внесенные в СОДИП, приводят к улучшению качества и точности расчета гидрометеорологических характеристик. Таким образом, разработанная система с учетом внесенных изменений позволяет, в том числе, воспроизводить сезонные и межгодовые колебания уровня Каспийского моря и может быть использована как для выполнения прогнозов гидрологических и метеорологических характеристик, так и для проведения ретроспективных расчетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Каспийское море, циркуляция океана, оперативное моделирование, численные методы.

¹ Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Кропоткинский пер., д. 6, 119034, Москва, Россия, *e-mail*: vladimirfomin@live.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, 119991, Москва, Россия.

³ Институт вычислительной математики РАН, ул. Губкина, д. 8, 119333, Москва, Россия, *e-mail*: nikolay.diansky@gmail.com

⁴ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», пр. А. Невского, д. 50, 185030, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, *e-mail*: vyruchi@list.ru

Vladimir V. Fomin¹, Nikolay A. Diansky^{1,2,3}, Tatiana Yu. Vyruchalkina⁴

APPROVAL OF THE OPERATIONAL DIAGNOSE AND FORECASTING SYSTEM OF HYDROMETEOROLOGICAL CHARACTERISTICS FOR CASPIAN SEA

ABSTRACT

The development of the Marine and Atmospheric Research System (MARS) for simulation of the Caspian Sea hydrometeorological characteristics is presented. It includes computation of the atmospheric forcing with the regional non-hydrostatic atmosphere model Weather Research and Forecasting model (WRF), as well as computation of currents, sea level, temperature, salinity and sea ice with the model of marine circulation INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) and the computation of wind wave parameters using the Russian wind-wave model (RWWM). The results on verification of the hydrometeorological characteristics of diagnosis and forecast computations with MARS are presented. Verification of the regional non-hydrostatic atmospheric model WRF was performed using data from coastal weather stations. Based on the results of retrospective computations, the quality of calculated meteorological characteristics was estimated taking into account its synoptic and seasonal variability. It was shown that an increase in spatial resolution of WRF model leads to an improvement in the reproduction of meteorological characteristics. Based on the results of the forecast computations, the quality of calculated meteorological characteristics was estimated according to forecast time. The verification of the INMOM model was carried out according to data from hydrological stations and also based on the results of computations of interannual variability of sea level. It is shown that changes made in MARS lead to a quality improvement in computation results. Thus, new version of MARS allows to reproduce seasonal and interannual changes of the Caspian sea level and can be used both for diagnose and forecast computations of hydrological and meteorological characteristics.

KEYWORDS: Caspian Sea, ocean circulation, operational modeling, numerical methods.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия уровень моделирования циркуляции в океанах и морях существенно вырос. Это направление продолжает интенсивно развиваться, что определяется существенно возросшими возможностями вычислительной техники. На данном этапе развития численного моделирования решается проблема не только качественного изучения физических процессов морской циркуляции, но и количественного ее описания, в том числе и в оперативном режиме. Это необходимо для практических нужд при разведке, добыче и транспортировке углеводородов на шельфе и в прибрежной области. Для реализации подобного численного моделирования требуется создание комплекса, включающего модель расчета атмосферного воздействия, модель морской термогидродинамики и модель ветрового волнения. Этот комплекс моделей должен быть объединен в единую вычислительную систему. Такая система реализована в Гидрометцентре РФ и включена в оперативную практику [Попов и др., 2013; Попов, Любов, 2017]. Она основана на использовании модели

¹ State Oceanographic Institute (SOI), Kropotkinsky Lane 6, 119034, Moscow, Russia, *e-mail*: vladimirfomin@line.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Leninskie Gory, bldg 1, str. 2, 119991, Moscow, Russia.

³ The Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Gubkin str., 8, 119333, Moscow, Russia, *e-mail*: nikolay.diansky@gmail.com

⁴ Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Aleksander Nevsky str., 50, 185030, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, *e-mail*: vyruchi@list.ru

диагноза и прогноза уровня моря [Попов, Лобов, 2017], а метеорологические параметры рассчитываются по модели COSMO. Подобная система также реализована и развивается в Государственном океанографическом институте имени Н.Н. Зубова (ГОИН) [Дианский и др., 2016а, б]. Одним из существенных отличий разрабатываемой в ГОИНе [Дианский и др., 2016а, б] от реализованной в Гидрометцентре [Попов, Лобов, 2017] системы заключается в использовании модели морской циркуляции, в которой прогностическими переменными служат не только скорости течений и уровень моря, но также температура и соленость воды, сплоченность, толщина и скорость дрейфа морского льда.

В настоящей статье показаны результаты расчетов, полученные с помощью Системы оперативного диагноза и прогноза (СОДИП), реализованной для расчета гидрометеорологических характеристик Каспийского моря. Она включает в себя расчет атмосферного воздействия по региональной негидростатической атмосферной модели Weather Research and Forecasting model (WRF) [Skamarock, 2008], расчет течений, уровня, температуры, солености моря и морского льда по модели морской циркуляции INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model) [Дианский, 2013]. Разработанный комплекс гидродинамического моделирования используется не только для оперативного прогноза, но и для расчетов режимных характеристик. Ранее [Дианский и др., 2016а, б] была проведена верификация СОДИП по данным стационарных метеостанций и показана ее работоспособность для Каспийского моря по результатам ретроспективных расчетов морской динамики и характеристик ветрового волнения за безледный период (август, сентябрь, октябрь) 2003–2013 гг. На основе полученных результатов были показаны важные особенности циркуляции вод Каспийского моря. Отмечено, что основной вклад в циркуляцию Каспийского моря делают ветровые течения, а апвеллинг в восточной части Среднего Каспия обусловлен региональными ветрами северного направления. Установлено, что только в Южном Каспии наблюдается существенное различие течений, рассчитанных по разным моделям. Ветровые поля, рассчитанные в СОДИП с помощью негидростатической модели WRF и полученные по формулам геострофического ветра по полю давления из этой же модели, также хорошо согласованы в Среднем и Северном Каспии и существенно отличаются в Южном Каспии. Особенно это заметно у восточного и южного берегов, когда ветер, рассчитанный в WRF, направлен поперек изобар. Показано, что поля ветра и течений связаны. Сделан вывод о том, что для Каспийского моря необходимо использовать для расчета ветра негидростатические модели атмосферы типа WRF или COSMO [Дианский и др., 2016а, б]. В настоящей работе представлено развитие данной системы. При воспроизведении метеорологических характеристик разрешение модели WRF было увеличено с 15 до 7 км. Была проведена серия экспериментов по верификации модели и показано различие в результатах с использованием 15 и 7-км версий модели. Также были проведены испытания системы и проведена оценка качества результатов расчетов в прогностическом режиме. Для модели INMOM была реализована возможность расчета циркуляции Каспийского моря с учетом реальных значений втока рек через их устьевые зоны и, соответственно, их влияние не только на соленостный режим, но также и на уровень моря. Более подробно полученные результаты представлены в следующих разделах работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основу вычислительного комплекса расчета гидротермодинамических характеристик, включая поля течений, уровня, температуры, солености и морского льда, составляет российская модель циркуляции океанов и морей INMOM [Дианский, 2013]. Расчет ат-

мошферного воздействия проводится по региональной модели атмосферной циркуляции WRF [Skamarock, 2008]. Достоинством системы является и то, что ее можно использовать для расчетов и в ретроспективном режиме. Для этого необходимо отключить прогностические расчеты, а в качестве входных данных использовать поля глобального реанализа за соответствующий период.

Расчет метеорологических параметров, морской циркуляции и параметров волнения происходит один раз в сутки на трое суток вперед. В отличие от предыдущих работ [Дианский и др., 2016а, б] в СОДИП была увеличена длительность расчета до 96 часов, которая включает в себя: расчет системы в режиме диагноза на предшествующие 24 часа, а также прогноз на следующие 72 часа. При развитии экстремальных штормовых ситуаций и необходимости их предсказания длительность прогноза может быть увеличена вплоть до 240 часов.

Качество расчета морской циркуляции во многом определяется качеством расчета атмосферного воздействия. В наших расчетах для этого применяется модель WRF, которая, в силу своего высокого качества и удобства использования, принята во многих зарубежных и отечественных центрах для воспроизведения и прогноза региональной атмосферной циркуляции. Ниже приводится описание атмосферной и морской составляющих вычислительного комплекса СОДИП.

В работе Зырянова [Зырянов, 2015] было показано, что над котловинами внутри сепаратрисной изобаты в областях замкнутых изолиний ветер играет главную роль в формировании циркуляции вод, далее по порядку величин следуют бароклинность вод и испарение. Использование данных реанализа и прогноза, к примеру, центра ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) в прогностических моделях не рекомендуется, так как на сайте разработчика приведено критическое замечание, что иногда результаты расчетов полей ветра нельзя признать удовлетворительными, в частности, для Средиземного и Каспийского морей [Зырянов, 2016]. Особенно это усугубляется для прибрежных акваторий [Зырянов, 2015, 2016]. Это служит основанием для критического отношения к данным реанализа полей ветра над Каспием. Поэтому в СОДИП необходимые характеристики атмосферных приводных параметров рассчитываются по негидростатической модели атмосферы WRF, которая хорошо воспроизводит склоновые потоки воздуха, вызывающие хорошо известные ветры типа черноморской Боры или однотипного с ней Бакинского норда – сильного, холодного и сухого ветра в районе г. Баку.

Для прогноза метеорологических характеристик используется негидростатическая региональная атмосферная модели WRF. В рамках развития системы прогноза разрешение модели было увеличено с 15 до 7 км. Временной шаг интегрирования модели по времени составил 45 с. По горизонтали расчетная область модели содержит 170 на 220 точек в модельных координатах. Количество горизонтов по вертикали также было увеличено с 27 и составило 35 уровней. Модель WRF для акватории Каспийского моря была реализована в проекции Ламберта. Методика расчета характеристик атмосферы по WRF заключается в интегрировании полной системы негидростатических уравнений динамики атмосферы [Skamarock, 2008] в исследуемом регионе. Граничными и начальными условиями служат данные GFS с пространственным разрешением 0,5° и временной дискретностью 6 часов. Подстилающая поверхность задана данными архива MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с пространственным разрешением 30”.

Для вычисления потоков тепла, пресной воды и импульса на поверхности моря используются следующие величины, полученные при расчете WRF и выдаваемые с шагом 1 час: температура и удельная влажность воздуха на высоте 2 м над уровнем

моря; скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря; падающая коротковолновая и длинноволновая радиация; атмосферные осадки; давление на уровне моря. Эти параметры используются для расчета атмосферного воздействия в физически полной модели морской циркуляции INMOM (в RAVM используются только поля ветра). Турбулентные потоки тепла, пресной воды и импульса рассчитываются с использованием балк-формул [Дианский, 2013] для расчета гидротермодинамических характеристик циркуляции моря.

Для расчета морской циркуляции используется модель циркуляции океанов и морей INMOM [Дианский, 2013; Zalesnyetal., 2012], относящаяся к классу σ -моделей. В ее основе лежит полная система так называемых примитивных уравнений гидротермодинамики моря в сферических координатах в приближениях гидростатики и Буссинеска [Дианский, 2013]. В качестве вертикальной координаты используется безразмерная величина σ , задаваемая как

$$\sigma = (z - \zeta) / (H - \zeta), \quad (1)$$

где z – обычная вертикальная координата, направленная вниз; $\zeta = \zeta(\lambda, \varphi, t)$ – отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности как функция долготы λ , широты φ и времени t ; $H = H(\lambda, \varphi)$ – невозмущенная глубина моря. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура (T), соленость (S), отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности, масса и сплоченность морского льда, масса снега, скорость дрейфа льда и компоненты тензора напряжений льда. Для расчета плотности используется уравнение состояния, специально предназначенное для численных моделей [Brydonetal., 1999].

Пространственное разрешение модели составляет 1'8" и 0'49" по долготе и широте, что равно ~1,5 км. Сеточная область в горизонтальной плоскости содержит 393 × 779 узлов. По вертикали задается 20 неравномерно распределенных по глубине σ -уровней.

Подробное описание модели INMOM для акватории Каспийского моря, используемых данных при подготовке начальных и граничных условий представлено в работах [Дианский и др., 2016а, б].

Расчет атмосферного воздействия осуществляется по вышеописанным приводным синоптическим характеристикам атмосферы из модели WRF для вычисления потоков импульса, тепла и пресной воды для расчета гидротермодинамических характеристик циркуляции моря в модели INMOM.

В рамках развития модели INMOM для акватории Каспийского моря было проведено улучшение сеточной области модели для повышения точности описания прибрежной зоны для акватории Каспийского моря, в частности, для его северной части. Главным изменением в модели INMOM была реализация возможности расчета циркуляции Каспийского моря с учетом реальных значений втока рек через их устьевые зоны и, соответственно, их влияние не только на соленостный режим, но также и на уровень моря. Реализованный блок учета речного стока позволил более корректно учесть изменение уровня моря Каспия за счет влияния речного стока, осадков и испарения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОДИП В ОПЕРАТИВНЫХ РАСЧЕТАХ

Оценка качества результатов, полученных с использованием СОДИП для Каспийского моря, проводилась с использованием данных ретроспективных расчетов за 2012 г. и по данным прогностических расчетов за период с 1 января по 30 апреля 2017 г. Верификация проводилась по данным стационарных метеостанций, расположение точек и их координаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Координаты точек для верификации и модели WRF
Table 1. Weather station coordinates for verification of WRF model

Название станции	Широта	Долгота	Название станции	Широта	Долгота
Ганюшкино	46,6	49,267	Баку	40,417	49,783
Лиман	45,8	47,217	Аэропорт «Гейдар Алиев»	40,468	50,047
Лагань	45,4	47,35	Актау	43,86	51,092
Атырау 1	47,117	51,917	Шевченко	43,583	51,083
Кочубей	44,4	46,55	Атырау 2	47,122	51,821
Кизляр	43,833	46,717	Туркменбаши 1	40,063	53,007
Дербент	42,067	48,3	Туркменбаши 2	40,033	52,983
Махачкала	43	47,5	Есенгулы	37,467	53,967

Воспроизведение динамики приводной атмосферы с помощью модели WRF

Верификация модели WRF проводилась по результатам ретроспективных и прогностических расчетов. При проведении верификации ретроспективных расчетов использовались данные за 2012 г. Результаты верификации по станциям для 7-км версии модели WRF представлены в табл. 2. Для сравнения результатов с результатами предыдущих расчетов в табл. 3 приведены результаты за 2012 г. для 15-км версии модели WRF. В качестве примера на рис. 1 представлены временные ряды для скорости ветра, зональной и меридиональной компонент, давления и температуры воздуха для ГМС Кочубей, рассчитанные по модели WRF с разрешением в 7 км и полученные по данным с метеостанции.

В табл. 2 и 3 представлены результаты верификации моделей WRF с 7 и 15 км разрешением соответственно. Результаты расчетов, представленные в табл. 2, показывают хорошую точность модели и подтверждают возможность воспроизведения моделью реальной атмосферной циркуляции над акваторией Каспийского моря. Результаты верификации показывают, как коэффициент корреляции для температуры воздуха изменяется от 0,95 до 0,99, в среднем составляя 0,99. Здесь необходимо отметить, что коэффициент корреляции рассчитывался с учетом годового хода. Среднеквадратичная ошибка в результатах расчета температуры воздуха изменяется от 1,36 до 3,71 °C и в среднем составляет 1,87 °C. Анализ графиков изменения температуры воздуха по результатам моделирования и данным измерений показывает, что модель качественно воспроизводит изменчивость температуры над акваторией Каспийского моря. При этом, в периоды резкого изменения характеристик температуры, которые в большей степени наблюдаются в зимний период, наблюдается завышение температур по результатам расчета по модели WRF.

Анализ коэффициентов корреляции для модуля скорости течений показывает, что коэффициент корреляции для представленных станций изменяется от 0,66 до 0,91 и в среднем составляет 0,82, что является достаточно высокими показателем. Среднеквадратичная ошибка изменяется от 0,4 до 1,07 см/с и в среднем составляет 0,82 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 период экстремальных ситуаций, что может быть особенно важно при моделировании ветровых нагонов. Результаты сравнения зональной и меридиональной компонент скорости ветра показывают, что коэффициент корреляции для зональной компоненты скорости ветра изменяется от 0,31 до 0,98 и в среднем составляет 0,85. Коэффициент корреляции для меридиональной компоненты скорости ветра изменяется от 0,63 до 0,96 и в среднем составляет 0,83. Среднеквадратичная ошибка в среднем по всем станциям составляет 1,06 м/с и 1 м/с для зональной и меридиональной компонент соответственно. Выделяется слабая корреляционная связь для зональной компоненты скорости ветра для метеостанции Баку. Учитывая, что зна-

чительно более высокие значения коэффициента корреляции наблюдаются для остальных станций, то, вероятнее всего, данная станция экранирована от ветров определенных румбов. В целом, на остальных станциях наблюдаются высокие значения коэффициента корреляции и незначительные значения среднеквадратичной ошибки, которая в среднем за год практически не превышает 1 м/с. 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 изменяется от 0,96 до 1,0 и в среднем составляет 0,99. Среднеквадратичная ошибка изменяется от 0,45 до 1,88 гПа. Визуальный анализ графиков сравнения также показывает высокое соответствие результатов моделирования с данными наблюдений.

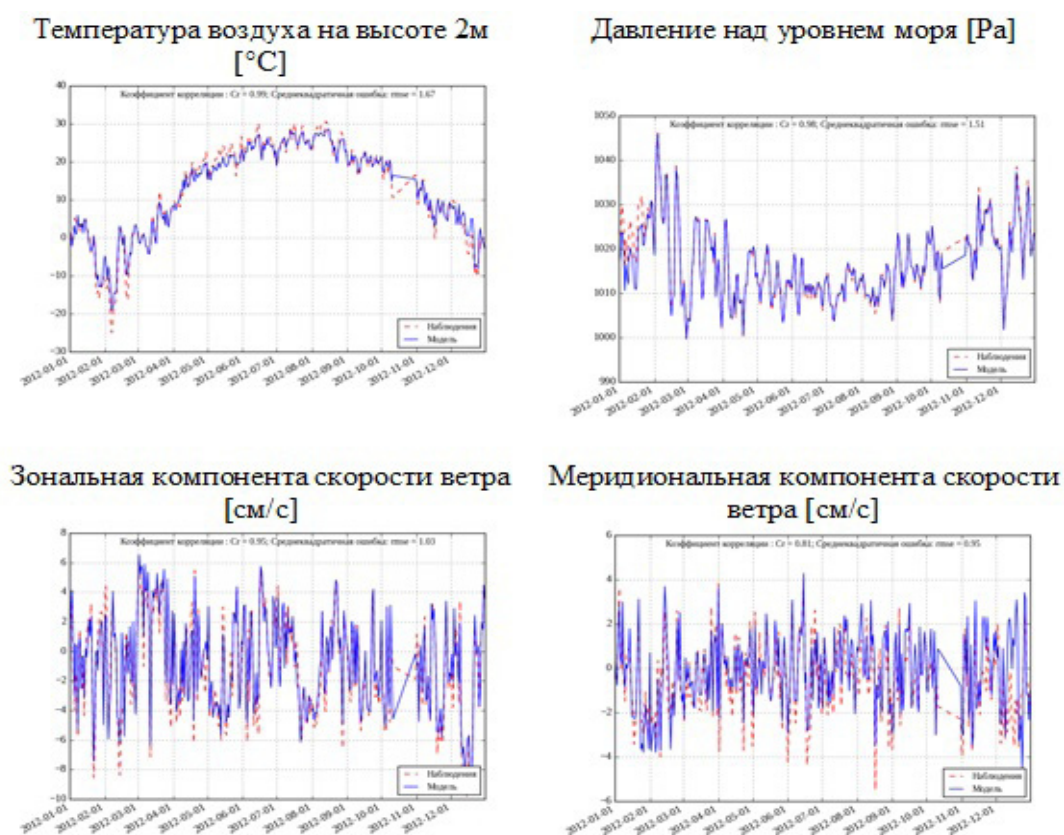


Рис. 1. Сравнение реализаций метеорологических характеристик по результатам моделирования по модели WRF с разрешением 7 км и по данным измерений на станции Кочубей
Fig. 1. Comparison of meteorological characteristics from the computation results from the WRF model with a resolution of 7 km and measurements at the Kochubei station

Таким образом, по результатам комплексного сравнения данных измерений с результатами моделирования метеорологических характеристик по модели WRF с горизонтальным разрешением в 7 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 экстремальные значения, что особенно важно при моделировании штормовых нагонов и сгонов на акватории Каспийского моря.

Дополнительно к верификации результатов моделирования с данными наблюдений была проведена оценка улучшения результатов моделирования по модели WRF с разрешением 7 км (табл. 2) относительно результатов моделирования по модели WRF с разрешением 15 км (табл. 3). В табл. 2 курсивом отмечены станции, верификация по которым проводилась для версии модели с 15-км разрешением. При этом жирным в табл. 2 выделены те параметры, значения которых улучшились при использовании модели с более высоким пространственным разрешением. Анализ данных таблиц показывает, что практически для всех станций произошло улучшение коэффициента корреляции, что говорит о более точном воспроизведении наступления различных синоптических станций. В целом, для всех метеорологических параметров, коэффициент корреляции улучшился на 0,01–0,08, в том числе и для модуля скорости ветра, а также для его отдельных компонент. Таким образом, увеличилась возможность более точного предсказания времени наступления максимального нагона и минимального сгона в различных прибрежных пунктах на акватории Каспийского моря.

Таблица 2. Сравнение результатов расчета по модели WRF с разрешением 7 км и данных с прибрежных метеостанций

Table 2. Comparison of the computation results according to the WRF model with a spatial resolution of 7 km and data from coastal weather stations

Название пункта	Температура воздуха	Модуль скорости ветра	Зональная компонента скорости ветра	Меридиональная компонента скорости ветра	Давление над уровнем моря
<i>Ганюшкино</i>	0,99/1,97	0,85/1,03	0,94/1,19	0,84/1,08	0,99/1,1
Лиман	0,99/1,88	0,88/0,4	0,93/0,68	0,81/0,68	1/0,52
<i>Лагань</i>	0,98/2,02	0,91/0,71	0,96/0,9	0,63/1,22	1/0,51
<i>Атырау 1</i>	0,99/1,97	0,84/0,93	0,92/1,1	0,88/0,93	1/0,45
<i>Кочубей</i>	0,99/1,67	0,85/0,82	0,95/1,03	0,81/0,95	0,98/1,51
Кизляр	0,99/1,48	0,9/0,79	0,94/1,09	0,66/0,82	1/0,59
Дербент	0,99/1,66	0,66/0,58	0,79/0,64	0,85/0,92	0,99/0,9
Махачкала	0,99/1,76	0,79/0,79	0,91/1,04	0,92/0,7	0,99/0,8
Баку	0,98/2,09	0,82/0,92	0,31/0,99	0,91/1,2	0,99/1
<i>Аэропорт «Гейдар Алиев»</i>	0,99/1,36	0,91/1,07	0,59/1,66	0,96/1,25	0,96/1,88
<i>Актау</i>	0,99/1,45	0,86/0,82	0,95/1,07	0,92/0,87	0,99/1,15
Шевченко	0,95/3,71	0,74/1,01	0,88/1,43	0,66/1,25	1/0,74
<i>Атырау 2</i>	0,99/2,04	0,91/0,81	0,98/0,9	0,96/0,84	0,99/0,79
<i>Туркменбаши 1</i>	0,99/1,51	0,83/0,85	0,9/1,15	0,91/1,23	0,99/0,92
Туркменбаши 2	0,99/1,82	0,73/0,9	0,88/1,23	0,85/1,45	0,99/1,12
Есенгулы	0,99/1,52	0,68/0,64	0,83/0,93	0,64/0,63	0,99/1,01
Минимум	0,95/1,36	0,66/0,4	0,31/0,64	0,63/0,63	0,96/0,45
Среднее	0,99/1,87	0,82/0,82	0,85/1,06	0,83/1	0,99/0,94
Максимум	0,99/3,71	0,91/1,07	0,98/1,66	0,96/1,45	1/1,88

Примечание.* В числителе – коэффициент корреляции (Cr), в знаменателе – среднеквадратичная ошибка (rmse).

Верификация прогностических расчетов приводилась за период с 1 января по 30 апреля 2017 г. Оценивались значения средней абсолютной ошибки ($|\delta|$), средней арифметической ошибки ($\bar{\delta}$), среднеквадратичного отклонения (СКО), коэффициента корреляции Rс. Верификация проводилась по всем ГМС, представленным в табл. 1. В табл. 4 представлены результаты оценки качества результатов для диагностических результатов, результатов прогноза за 1–3 суток, осредненные по всем представленным станциям. Результаты расчетов показывают, что наилучшие значения статистических параметров наблюдаются для диагностических данных. Постепенно результаты ухудшаются, и наихудшие результаты наблюдаются для 3 дня прогноза.

Таблица 3. Сравнение результатов расчета по модели WRF с разрешением 15 км
и данных с прибрежных метеостанций

Table 3. Comparison of calculation results according to the WRF model with
a spatial resolution of 15 km and data from coastal weather stations

Название пункта	Температура воздуха	Модуль скорости ветра	Зональная компонента скорости ветра	Меридиональная компонента скорости ветра	Давление над уровнем моря
Актау	0,99/1,54	0,79/0,89	0,94/1,14	0,89/0,95	0,99/0,99
Атырау 1	0,99/1,59	0,82/0,75	0,92/0,95	0,87/0,95	1,00/0,65
Атырау 2	0,99/1,79	0,87/0,82	0,97/0,96	0,93/1,04	
Аэропорт «Гейдар Алиев»	0,95/2,58	0,78/1,47	0,59/1,50	0,92/1,66	0,99/0,92
Ганюшкино	0,99/1,93	0,80/1,03	0,92/1,23	0,77/1,27	0,99/1,21
Кочубей	0,98/1,87	0,80/0,92	0,96/0,96	0,77/1,04	0,99/0,78
Лагань	0,98/2,12	0,88/0,79	0,95/0,93	0,63/1,22	1,00/0,61
Туркменбаши	0,98/1,82	0,76/0,99	0,85/1,38	0,87/1,37	

Примечание.* В числителе – коэффициент корреляции (Cr), в знаменателе – среднеквадратичная ошибка (rmse).

Таблица 4. Средняя абсолютная ошибка ($|\delta|$), средняя арифметическая ошибка ($\bar{\delta}$), среднеквадратичное отклонение (СКО), коэффициент корреляции R_c , полученные по результатам сравнения данных измерений температуры воздуха, давления на уровне моря, модуля скорости ветра и его зональной и меридиональной компонент, осредненные по всем станциям
Table 4. Mean absolute error ($|\delta|$), mean arithmetic error ($\bar{\delta}$), standard deviation (RMS), correlation coefficient R_c , obtained from the comparison of air temperature, sea level pressure, wind velocity and its zonal and the meridional component averaged over all stations

Тип	$ \delta $	$\bar{\delta}$	СКО	R_c
Давление на уровне моря				
Диагноз	0,87	-0,25	1,08	0,99
Прогноз (1 день)	0,95	-0,24	1,17	0,99
Прогноз (2 день)	1,13	0,12	1,41	0,98
Прогноз (3 день)	1,54	0,35	1,96	0,97
Температура воздуха				
Диагноз	1,70	0,51	2,23	0,92
Прогноз (1 день)	1,76	0,49	2,33	0,91
Прогноз (2 день)	1,80	0,43	2,38	0,91
Прогноз (3 день)	1,88	0,38	2,47	0,90
Модуль скорости ветра				
Диагноз	1,96	-0,31	2,46	0,76
Прогноз (1 день)	1,97	-0,34	2,48	0,75
Прогноз (2 день)	1,98	-0,36	2,50	0,75
Прогноз (3 день)	2,08	-0,40	2,65	0,72
Зональная компонента скорости ветра				
Диагноз	1,64	0,28	2,10	0,76
Прогноз (1 день)	1,68	0,14	2,16	0,75
Прогноз (2 день)	1,68	0,03	2,15	0,75
Прогноз (3 день)	1,78	-0,05	2,30	0,71
Меридиональная компонента скорости ветра				
Диагноз	1,64	0,99	2,05	0,78
Прогноз (1 день)	1,66	0,98	2,08	0,77
Прогноз (2 день)	1,66	0,92	2,10	0,76
Прогноз (3 день)	1,77	0,89	2,25	0,70

При этом необходимо отметить, что если для характеристик давления и температуры воздуха ухудшение ошибки незначительно и происходит постепенно, например, ухудшение коэффициента корреляции происходит максимум на 0,01, то для скорости течений равномерное ухудшение результатов наблюдается в первый и второй день прогноза, то при рассмотрении 3-го дня прогноза наблюдается существенное ухудшение результатов, и коэффициент корреляции уменьшается как минимум на 0,04 и как максимум на 0,06 для модуля скорости ветра и компонент скорости ветра. В то же время представленные результаты показывают, что даже для третьего дня прогноза коэффициент корреляции для скорости ветра, его компонент, температуры воздуха или давления на уровне моря достигают высоких значений. Таким образом, результаты верификации в режиме опытной эксплуатации показывают, что система расчета гидрометеорологических характеристик с достаточно высокой степенью точности воспроизводит метеорологические характеристики и с ее использованием могут быть осуществлены прогнозы метеорологических характеристик.

Ретроспективное воспроизведение уровня Каспия с помощью СОДИП

Верификация модели INMOM в рамках работы системы СОДИП для акватории Каспийского моря представлена в работах [2, 3], где показано, что модель с достаточно хорошей степенью точности может воспроизводить изменчивость температуры, солености и уровня моря. В данной работе подробно остановимся на воспроизведении изменчивости уровня моря на межгодовом масштабе.

Расчеты по моделированию изменчивости уровня моря проводились за период с 1982 по 1992 г. При проведении расчетов использовались данные атмосферного форсинга CORE, так как в настоящее время это единственный массив данных, сбалансированный по потокам тепла, соли и импульса для всей акватории мирового океана. Данные CORE представляют из себя 6-часовые и суточные поля метеорологических характеристик, таких как компоненты скорости ветра, температура воздуха, влажность, осадки, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации [Griffies et al., 2004].

При моделировании проводился учет основных рек Каспийского моря, а именно: Волга, Кура, Урал, Терек, Самур, Сулак. В модели задавались реальные среднемесячные значения расходов за исследуемый период по времени. При этом в случае, если отсутствуют реальные данные за конкретный месяц, использовались климатические значения стока соответствующих рек за данный период. Моделирование проводилось на сеточной области, в которой учтены Кара-Богаз-Гола в данном случае проводился параметрически путем задания реальных среднемесячных значений вытока из Каспийского моря.

В качестве начальных полей для расчета использовались трехмерные климатические поля температуры и солености Каспия для января, проинтерполированные на модельную сетку. Расчет начинался из состояния покоя. Численные расчеты проводились без релаксации к поверхностным значениям температуры и солености.

Следует отметить, что возможность воспроизведения уровня моря зависит от нескольких факторов. Первый и основной фактор – это данные об реальных расходах основных рек, так как это основной фактор изменчивости уровня моря Каспийского моря. Также, немаловажным фактором является необходимость использования корректных данных по потокам из атмосферы в океан. Данные форсинга CORE предоставляются на сеточной области с разрешением в $2,5^\circ$ по долготе и неравномерным шагом на Гауссовой сетке по широте ($\sim 1,8^\circ$). Несмотря на то, что данные форсинга CORE сбалансированы по потокам тепла, соли и импульса для всей акватории Мирового океана, для отдельных его регионов может наблюдаться дисбаланс, так как при указанных шагах по пространству область Каспийского моря описывается довольно грубо. Поэтому основной упор был сделан на калибровку дан-

ных атмосферного воздействия для получения уровня моря наиболее приближенного к реальному уровню Каспийского моря. Необходимо отметить, что работы по воспроизведению межгодовых колебаний уровня моря проводились также и другими авторами [Попов, Лобов, 2013; Дьяконов, Ибраев, 2018], а вопросы калибровки параметров атмосферного воздействия также отражены в работе [Дьяконов, Ибраев, 2018]. Калибровка проводилась для:

- потока падающей коротковолновой радиации;
- потока скрытого тепла.

Результаты расчетов показали, что наилучшие результаты при расчете изменчивости уровня Каспийского моря с использованием данных атмосферного воздействия CORE достигаются при корректировке потока скрытого тепла на 8,4 % в сторону увеличения. На рис. 2 представлены результаты расчетов изменения уровня с 1982 по 1992 г. в базовом эксперименте без корректировок, а также с корректировкой потока скрытого тепла и потока коротковолновой радиации. Как видно из полученных результатов – несмотря на то, что существенный вклад в баланс вод в Каспийском море вносит изменение стока его основных рек, необходим точный учет атмосферного воздействия в виде осадков и испарения над акваторией Каспийского моря для получения по результатам моделирования наиболее корректного результата.

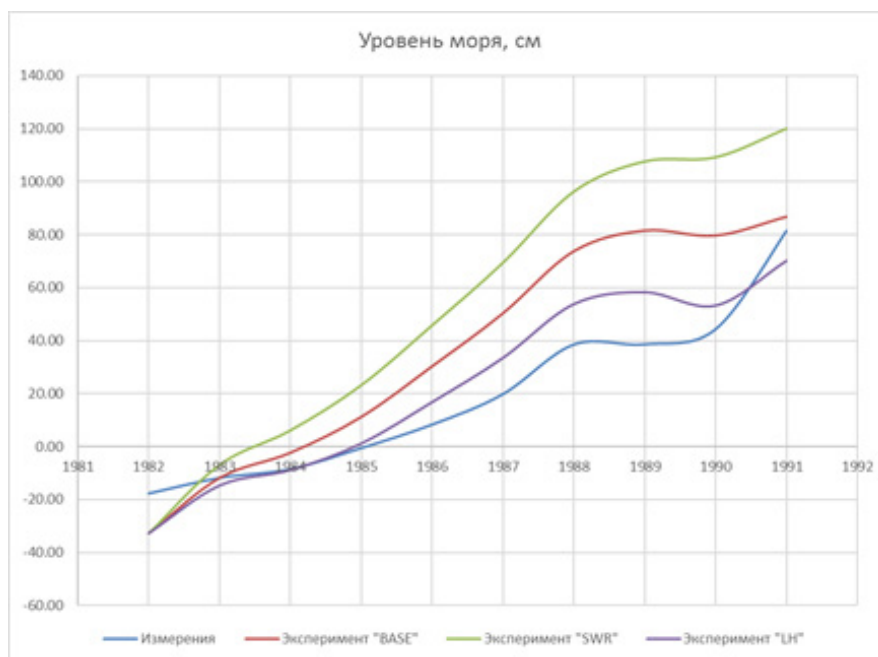


Рис. 2. Изменение среднегодового уровня Каспия по результатам расчета модели INMOM и данным измерений

Fig. 2. Comparison of computation results of year mean Caspian sea level according to INMOM model and observational data

ВЫВОДЫ

Представлено развитие единого расчетного комплекса – системы оперативного диагноза и прогноза (СОДИП) Каспийского моря. Она включает в себя расчет атмосферного воздействия по региональной негидростатической атмосферной модели WRF, расчет течений, уровня, температуры, солености моря и морского льда по модели морской циркуляции INMOM и расчет параметров волнения по PAVM.

Проведена верификация всех рассчитываемых с помощью СОДИП метеорологических характеристик для Каспийского моря по данным наблюдений на стационарных станци-

ях с использованием результатов модели WRF. Показано, что улучшение пространственного разрешения приводит к улучшению качества результатов расчетов. Испытания в режиме опытной эксплуатации показали, что даже на третьи сутки прогноза качество прогноза скорости ветра, температуры воздуха и давления остается на удовлетворительном уровне.

В модели INMOM была реализована возможность расчета циркуляции Каспийского моря с учетом реальных значений втока рек через их устьевые зоны и, соответственно, их влияние не только на соленостный режим, но также и на уровень моря. Реализованный блок учета речного стока позволил более корректно учесть изменение уровня моря Каспия за счет влияния речного стока, осадков и испарения. Была показана необходимость корректировки потоков, предоставляемых данными атмосферных реанализов, при этом в работе показано, что наилучшие результаты при использовании данных атмосферного воздействия CORE достигаются при корректировке потока скрытого тепла на 8,4 % в сторону увеличения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ, проект № 14-17-00740.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Humanities, project No 14-17-00740.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
2. Дианский Н.А., Фомин В.В., Выручалкина Т.Ю. Моделирование циркуляции каспийского моря с помощью морских и атмосферных расчетов системы MAPC // Труды Государственного океанографического института. 2016. № 217. С. 50–76.
3. Дианский Н.А., Фомин В.В., Выручалкина Т.Ю., Гусев А.В. Воспроизведение циркуляции Каспийского моря с расчетом атмосферного воздействия с помощью модели WRF // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2016. № 5. С. 21–34.
4. Дьяконов Г.С., Ибраев Р.А. Воспроизведение многолетней изменчивости уровня Каспийского моря в гидродинамической модели высокого разрешения. Океанология. 2018. Т. 58, № 1. С. 11–22.
5. Зырянов В.Н. Гидродинамические основы формирования крупномасштабной циркуляции вод Каспийского моря. 1. Асимптотическая теория // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 6. С. 600–612.
6. Зырянов В.Н. Гидродинамические основы формирования крупномасштабной циркуляции вод Каспийского моря. 2. Численные расчеты // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 1–1520.
7. Попов С.К., Батов В.В., Елисов В.В., Лобов А.Л. Усовершенствованная технология прогноза течений и уровня Каспийского моря. Научно-технический журнал Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 5. С. 53–59.
8. Попов С.К., Лобов А.Л. Диагноз и прогноз уровня Каспийского моря по оперативной гидродинамической модели // Метеорология и Гидрология. 2017. № 9. С. 90–99.
9. Попов С.К., Лобов А.Л. Моделирование пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря в 1948–1994 гг. // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 350. С. 68–87.
10. Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geoph. Res. 1999. V. 104, No. C1. P. 1537–1540.
11. Griffies S.M., Winton M., Samuels B.L. 2004: The Large and Yeager (2004) dataset and CORE. NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory PO Box 308, Forrestal Campus Princeton, New Jersey, 08542 USA (Manuscript last edited 28 September 2004).

12. *Large W.G., Yeager S.G.* The global climatology of an interannually varying air–sea flux. *Climate Dynamics*. 2009. V. 33. P. 341–364.
13. *Pacanowski R.C., Philander S.G.H.* Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. P. 1443–1451.
14. *Skamarock A.* Description of the Advanced Research WRF, Version 3 – NCAR Technical Notes, 2008.
15. *Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V., Moshonkin S.N., Demyshev S.G.* Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2012. V. 27, No 1. P. 95–111.

REFERENCES

1. *Brydon D., San S., Bleck R.* A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models. *J. Geoph. Res.* 1999. V. 104. No C1. P. 1537–1540.
2. *Diansky N.A.* Modelling of ocean circulation and investigation of its response to short- and long-period atmospheric forcing. M.: PhysMathLit, 2013. 272 p. (in Russian).
3. *Diansky N.A., Fomin V.V., Vyruchalkina T.Y.* Modeling of the Caspian sea circulation using marine and atmospheric calculations of system MARS. *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo institute*. 2016. No 217. P. 50–76 (in Russian).
4. *Diansky N.A., Fomin V.V., Vyruchalkina T.Y., Gusev A.V.* Numerical simulation of the Caspian sea circulation using the marine and atmospheric research system. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra Rossiiskoy akademii nauk*. 2016. No 5. P. 21–34 (in Russian).
5. *Dyakonov G.S., Ibrayev R.A.* Simulation of Interannual Variability of the Caspian Sea Level in a High Resolution Hydrodynamic Model. *Oceanology*. 2018. V. 58, No 1. P. 11–22 (in Russian).
6. *Griffies S.M., Winton M., Samuels B.L.*, 2004: The Large and Yeager (2004) dataset and CORE. NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory PO Box 308, Forrestal Campus Princeton, New Jersey, 08542 USA (Manuscript last edited 28 September 2004).
7. *Large W.G., Yeager S.G.* The global climatology of an interannually varying air–sea flux. *Climate Dynamics*. 2009. V. 33. P. 341–364.
8. *Pacanowski R.C., Philander S.G.H.* Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. P. 1443–1451.
9. *Popov S.K., Batov V.V., Elisov V.V., Lobov A.L.* Advanced technology for forecasting currents and the sea level of the Caspian Sea. *Scientific and technical journal environmental protection in the oil and gas complex*. 2013. No 5. P. 53–59 (in Russian).
10. *Popov S.K., Lobov A.L.* Diagnosis and forecast of the level of the Caspian Sea in the operational hydrodynamic model. *Meteorology and Hydrology*. 2017. 9. P. 90–99 (in Russian).
11. *Popov S.K., Lobov A.L.* Modelling of spatial and temporal variability of the Caspian Sea level 1948–1994. *Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia*. 2013. No 350. P. 68–87 (in Russian).
12. *Skamarock A.* Description of the Advanced Research WRF, Version 3. NCAR Technical Notes, 2008.
13. *Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V., Moshonkin S.N., Demyshev S.G.* Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2012. V. 27, No 1. P. 95–111.
14. *Zyryanov V.N.* Hydrodynamic basis of formation of large-scale water circulation in the Caspian Sea: 1. Asymptotic theory. *Water Resources*. 2015. V. 42. No 6. P. 294–304.
15. *Zyryanov V.N.* Hydrodynamic basis of formation of large-scale water circulation in the Caspian Sea: 2. Numerical simulation. *Water Resources*. 2016. V. 43, No 2. P. 292–305.