

УДК 551.465

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С РАСЧЕТОМ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ WRF

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

¹ Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова

² Институт вычислительной математики РАН

³ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

⁴ Институт водных проблем РАН

В работе описывается Система 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, солености 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 гидрометеорологических характеристик, полученных с помощью СОДИП. Также с ее помощью выполнены ретроспективные расчеты термогидродинамических характеристик для Каспийского моря за безледный период с 2003 по 2013 г. Показаны важные особенности циркуляции вод Каспийского моря. Основной вклад в циркуляцию Каспийского моря делают ветровые течения. В частности, 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. Для Каспийского моря необходимо использовать при расчете ветра негидростатические модели атмосферы типа WRF или COSMO.

Ключевые слова: Каспийское море; циркуляция океана; оперативное моделирование; численные методы; СОДИП.

N. A. Diansky, V. V. Fomin, T. Yu. Vyurchalkina, A. V. Gusev. NUMERICAL SIMULATION OF THE CASPIAN SEA CIRCULATION USING THE MARINE AND ATMOSPHERIC RESEARCH SYSTEM

The Marine and Atmospheric Research System (MARS) for simulation of the Caspian Sea meteorological 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 simulated with MARS are presented. Also, the retrospective simulation of the thermohydrodynamic characteristics for the Caspian Sea was performed with MARS for the ice-free period 2003–2013. The important features of the Caspian Sea circulation are shown. The wind currents contribute the most significantly to the Caspian Sea circulation. The upwelling effect in the eastern part of Middle Caspian is caused by regional northerly winds. It should be noted that where the outputs of different models for North and Middle Caspian are in good agreement, there is significant difference in the estimates of the currents in South Caspian. The wind fields computed in MARS using the non-hydrostatic model WRF and those obtained by the formulas of geostrophic wind inferred from the pressure field from the same model are in good agreement in Middle and North Caspian. However, they differ significantly for South Caspian. This is especially noticeable at the eastern and southern coasts, where the wind computed in WRF is directed transversely to the isobars. It is shown that the wind field and the current field are interconnected. For the Caspian Sea, one should use non-hydrostatic atmospheric models such as WRF or COSMO for wind computation.

Key words: Caspian Sea; ocean circulation; operational modeling; numerical methods; MARS.

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. Подобная система реализована и развивается в Государственном океанографическом институте имени Н. Н. Зубова (ГОИН).

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] и расчет параметров волнения по Российской атмосферно-волновой модели (PABM) [Кабатченко и др., 2001]. Разработанный комплекс гидродинамического моделирования используется не только для оперативного прогноза, но и для расчетов режимных характеристик.

Система оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических полей для Каспийского моря

Общая схема технологии вычислительного комплекса

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 атмосферного воздействия проводится по региональной модели атмосферной циркуляции WRF [Skamarock, 2008]. Для расчета ветрового волнения в вычислительный комплекс включена волновая модель PABM [Кабатченко и др., 2001]. На рис. 1 показана общая схема СОДИП, предназначенная для комплексного моделирования морской и атмосферной циркуляции, включая расчет ветрового волнения. Достоинством системы является и то, что ее можно использовать для расчетов и в ретроспективном

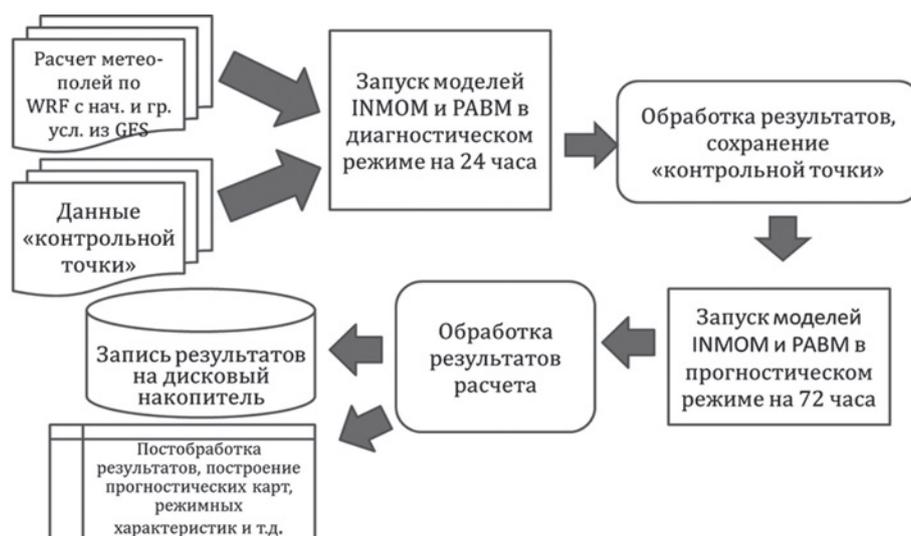


Рис. 1. Блок-схема СОДИП, реализованная для комплексного моделирования морской и атмосферной циркуляции, включая расчет ветрового волнения для акватории Каспийского моря

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 (от 18 часов предыдущего дня) с дискретностью сохранения выходной информации 1 час для атмосферного воздействия и характеристик волнения. Для всех гидрологических полей сохранение результатов производится с шагом 6 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, без подробного рассмотрения результатов расчета волнения по модели PABM. Следует только отметить, что в PABM решается уравнение баланса спектральной плотности волнового действия в сферических координатах для частотно-углового спектра [Кабатченко и др., 2001]. При этом используется «узконаправленная» теория ветрового волнения, предложенная Захаровым и соавторами [Zakharov et al., 1999], что позволяет ускорить численное решение задачи. Этим PABM отличается, например, от наиболее используемой в мире модели ветрового волнения WAM.

Моделирование региональной циркуляции атмосферы для расчета атмосферного воздействия

В работе Зырянова [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, т. к. 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.

В качестве расчетной области для WRF, используемой для оперативного расчета и прогноза метеорологических характеристик над Каспийским регионом, в СОДИП используется пространственная сетка с шагом 15 км

в равноугольной конической проекции Ламберта. Размер сеточной области имеет 60×90 точек по долготе и широте соответственно и 27 вертикальных уровней с верхней границей на уровне 50 гПа. Входными данными для модели WRF служат поля объективного анализа и прогноза GFS (Global Forecasting System) из National Centers for Environmental Prediction. 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 1° 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 PAVM используются только поля ветра). Турбулентные потоки тепла, пресной воды и импульса рассчитываются с использованием балк-формул [Дианский, 2013] для расчета гидротермодинамических характеристик циркуляции моря.

Численная модель циркуляции Каспийского моря

Для расчета морской циркуляции используется модель циркуляции океанов и морей INMOM [Zalesny et al., 2012; Дианский, 2013], 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 [Brydon et al., 1999].

Для более точного описания процессов динамики моря оператор боковой диффузии второго порядка для тепла и соли представлен в форме, эквивалентной горизонтальной диффузии в обычной z -системе координат [Дианский, 2013]. В уравнениях движения для описания боковой вязкости используется оператор 4-го порядка, эффективно подавляющий двухшаговую моду численного шума.

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

Параметризация крупномасштабной горизонтальной турбулентной диффузии для температуры и солености осуществляется с помощью оператора 2-го порядка с коэффициентом $50 \text{ м}^2/\text{с}$. В качестве горизонтальной вязкости применяется оператор 4-го порядка с коэффициентом $10^9 \text{ м}^2/\text{с}$.

В INMOM используется математически точная сферическая система координат, поэтому при расчете полей течений не вносятся топологических искажений, возникающих, например, при использовании декартовых систем координат, «натягиваемых» на участок сферической поверхности Земли.

Коэффициенты вертикальной вязкости и диффузии выбирались согласно параметризации [Pacanowski, Philander, 1981]. Коэффициент вертикальной вязкости изменялся от 10^{-4} до $10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, а диффузии – от 5×10^{-6} до $5 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ для T и от 1×10^{-6} до $1 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ для S . В случае неустойчивой стратификации для параметризации конвективного перемешивания коэффициент вертикальной диффузии задавался равным $2 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Аналогичное значение имеют коэффициенты диффузии и вязкости для более интенсивного перемешивания, чтобы избежать возможных для σ -модели ситуаций «выклинивания» вертикальных профилей T , S и скорости в приповерхностном 2,5-метровом слое моря.

Таблица 1. Координаты точек для верификации модели WRF и модели INMOM

Координаты точек для модели WRF			Координаты точек для модели INMOM		
Название	Широта	Долгота	Название	Широта	Долгота
Актау	43.860	51.092	Лагань	45.380	47.370
Атырау 1	47.117	51.917	Махачкала	42.970	47.600
Атырау 2	47.122	51.821	Саура	44.217	50.800
Аэропорт Гейдар Алиев	40.468	50.047	Тишково	45.900	48.600
Ганюшкино	46.600	49.267	Тюлений	44.467	47.483
Кочубей	44.400	46.550	Шевченко	44.650	50.230
Лагань	45.400	47.350			
Туркменбаши	40.063	53.007			

Для задания глубин использовались данные по топографии Земли GEBCO (www.gebco.net) с пространственным разрешением 30". Исходные данные высокого разрешения сглажены несколько раз с помощью фильтрации Тьюки и ограничены минимальной глубиной 2,5 м. Это необходимо при использовании σ -модели, так как в ней применяется преобразование вертикальной координаты (1), и, следовательно, функция $H = H(\lambda, \varphi)$ должна быть отличной от нуля и обладать достаточной гладкостью на выбранной пространственной сетке, поскольку входит во все операторы разностного дифференцирования [Zalesny et al., 2012; Дианский и др., 2013].

Для построения начальных условий по T и S использованы данные ФГБУ «ГОИН», предоставленные А. В. Григорьевым, представляющие собой трехмерные среднемесячные климатические поля для акватории Каспийского моря.

Для T и S на боковых границах и дне ставится условие отсутствия потоков, а для скорости – условие непротекания, дополненное условиями свободного скольжения на боковых границах и квадратичного трения на дне [Zalesny et al., 2012; Дианский и др., 2013].

Сток рек задается по данным климатического года CORE [Large, Yeager, 2009] в виде псевдоосадков, сосредоточенных в ячейках сетки, примыкающих к устьям рек.

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.

Осуществляется также релаксация поверхностной солёности к климатическим данным путем введения в поток солёности на поверхности моря, рассчитываемый через поток пресной воды, релаксационной

добавки, представляющей собой разность модельной и климатической приповерхностной солёности, умноженной на коэффициент $\alpha_s = 10$ м/120 сут. Необходимость использования коррекции потока пресной воды на поверхности моря продиктована тем, что точность задания осадков и стока рек недостаточно высока. При использовании такого метода проведения экспериментов модельная солёность не сильно отклоняется от ее климатической величины, что необходимо при проведении экспериментов на длительные временные периоды.

Результаты воспроизведения гидрометеохарактеристик в акватории Каспийского моря

Для того чтобы показать работоспособность СОДИП для Каспийского моря, приведем результаты ретроспективных расчетов морской динамики и характеристик ветрового волнения за безледный период (август, сентябрь, октябрь) с 2003 по 2013 г. Верификация проводилась по данным стационарных метеостанций, расположение точек и их координаты представлены в таблице 1.

Воспроизведение динамики приводной атмосферы с помощью модели WRF

При верификации WRF использовались данные наблюдений за 2012 и 2013 гг. Для остальных лет качество воспроизведения атмосферной циркуляции приблизительно то же. В таблице 2 представлено сравнение результатов расчетов по модели WRF температуры воздуха, модуля скорости ветра, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, давления над уровнем моря с наблюдаемыми данными. Результаты расчетов и наблюдений температуры воздуха, зональной составляющей скорости ветра и давления над уровнем моря практически совпадают ($C_r = 0,92-1,00$).

Таблица 2. Сравнение результатов расчета по модели WRF и измеренных данных

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 3. Сравнение результатов расчета по модели INMOM и измеренных данных

	Уровень моря	Температура воды	Соленость
Лагань		0.98/0.97/0.93	
Махачкала		0.99/-1.99/0.70	0.78/-0.62/1.52
Саура	0.48/0.61/4.43		
Тишково		0.95/-2.18/0.73	
Тюлений	0.86/-9.09/8.93	0.97/-1.50/1.19	
Шевченко	0.32/-0.49/4.12		

Примечание. По порядку показаны: коэффициент корреляции, среднее отклонение и среднеквадратичное отклонение.

Сравнение модельных и измеренных величин меридиональной компоненты скорости ветра и модуля скорости ветра дают меньшую согласованность с данными наблюдений ($Cr = 0,63-0,93$, $rmse = 0,75-1,47$). Поскольку в модели WRF атмосферные параметры воспроизводятся адекватно, не будем далее останавливаться на них.

Воспроизведение морской динамики с помощью модели INMOM

Для целостного восприятия картины циркуляции вод Каспийского моря были проанализированы поля течений, солености, температуры, ветра и др. В первую очередь покажем качество воспроизведения временного хода уровня моря, температуры и солености воды, рассчитанных по INMOM и проинтерполированных в места положения станций. В таблице 3 представлено сравнение результатов расчетов по INMOM с данными наблюдений. Показано, что INMOM достаточно хорошо воспроизводит только временную изменчивость температуры воды.

Из сравнения моделируемых атмосферных параметров (табл. 2) и параметров уровня, температуры и солености воды (табл. 3) с соответствующими данными наблюдений видно, что первые имеют с ними большую

согласованность. Сравнение модельных и измеренных величин вообще является фундаментальной проблемой современной океанографии. С одной стороны, измерения производятся в точках станций наблюдений, а модельные расчеты дают значения, осредненные в пределах ячейки расчетной сетки численной схемы. В нашем случае это $1,5 \times 1,5$ км. Следовательно, ожидать точного соответствия между модельными и наблюдаемыми значениями невозможно. С другой стороны, при обработке данных наблюдений за уровнем моря для исключения волновой составляющей используется простое скользящее среднее, которое также определяется с ошибкой. Поэтому волновая составляющая дает остаточные проявления волн в уровне моря. По этой же причине в данные наблюдений могут «просачиваться» и турбулентные пульсации разных масштабов. Это может приводить к недостаточной согласованности данных измерений с результатами моделирования, поскольку волновая составляющая и турбулентность в моделях морской циркуляции учитываются опосредованно путем эмпирических параметризаций. В силу того, что в атмосфере радиус деформации Россби в несколько десятков раз больше, чем в море, отмеченные проблемы для атмосферы менее существенны. Поэтому в настоящее время сравнение моделируемой

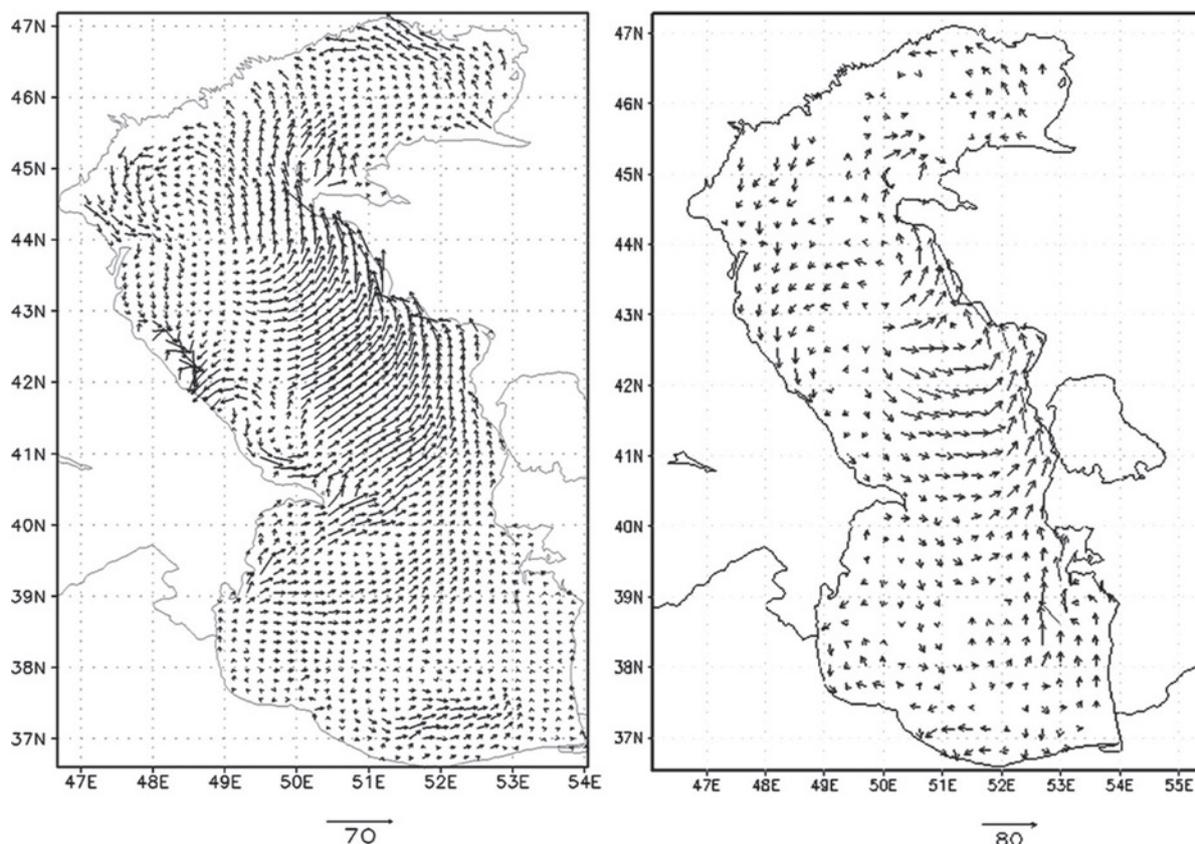


Рис. 2. Приповерхностные скорости течений по результатам расчета по модели INMOM (слева) и по ЕСИМО (справа) для 06.00UTC 09.10.2012 г.

и наблюдаемой атмосферной гидродинамики по качеству выше, чем морской. Следует учесть еще и ошибки при расчете атмосферного воздействия на морской поверхности, неизбежно возникающие даже при применении общепринятых современных балк-формул, что приводит и к ошибкам при расчете морской циркуляции, поскольку эти формулы являются эмпирическими и не могут отражать все особенности реального турбулентного взаимодействия атмосферы и океана с учетом ветрового волнения. В атмосфере всегда присутствуют так называемые внутренние волны, которые вызывают возмущения в поле давления на уровне моря в 1–3 гПа и в поле приповерхностного ветра. В свою очередь, это должно формировать возмущения уровня моря приблизительно в 2–5 см и, соответственно, в поле приповерхностных скоростей течений. При этом пространственно-временные масштабы возмущений достаточно малы. Поэтому для воспроизведения данного физического эффекта необходимо использовать атмосферную модель с таким же высоким пространственно-временным разрешением, как и модель морской циркуляции. Однако при современном уровне вычислительных возможностей этого пока сделать нельзя.

Ранее в [Ибраев, 2008] было показано, что в таком сравнительно небольшом и мелководном бассейне, как Каспийское море, течения определяются прежде всего прямым воздействием ветра. Характерная черта сезонной изменчивости ветра в Среднем и Южном Каспии – это изменение направления с восточного на северный от зимы к лету и переход с преимущественно циклонической завихренности на антициклоническую от осенне-зимнего к весенне-летнему периоду [Ибраев, Курдюмов, 2003; Кныш и др., 2008]. Таким образом, поверхностные течения над глубоководными районами Среднего и Южного Каспия меняют направление с северо-западного зимой на юго-западное летом в соответствии с преимущественно восточными ветрами зимой и северными – летом. У восточного берега Среднего и Южного Каспия на поверхности с апреля по сентябрь течение направлено на юг, а в конце года формируется апвеллинг [Ibrayev et al., 2001, 2010]. Эту особенность наглядно иллюстрируют оперативные приповерхностные характеристики для Каспийского моря, полученные в реальном времени. На рис. 2 и 3 показаны примеры полей скорости поверхностных течений по результатам

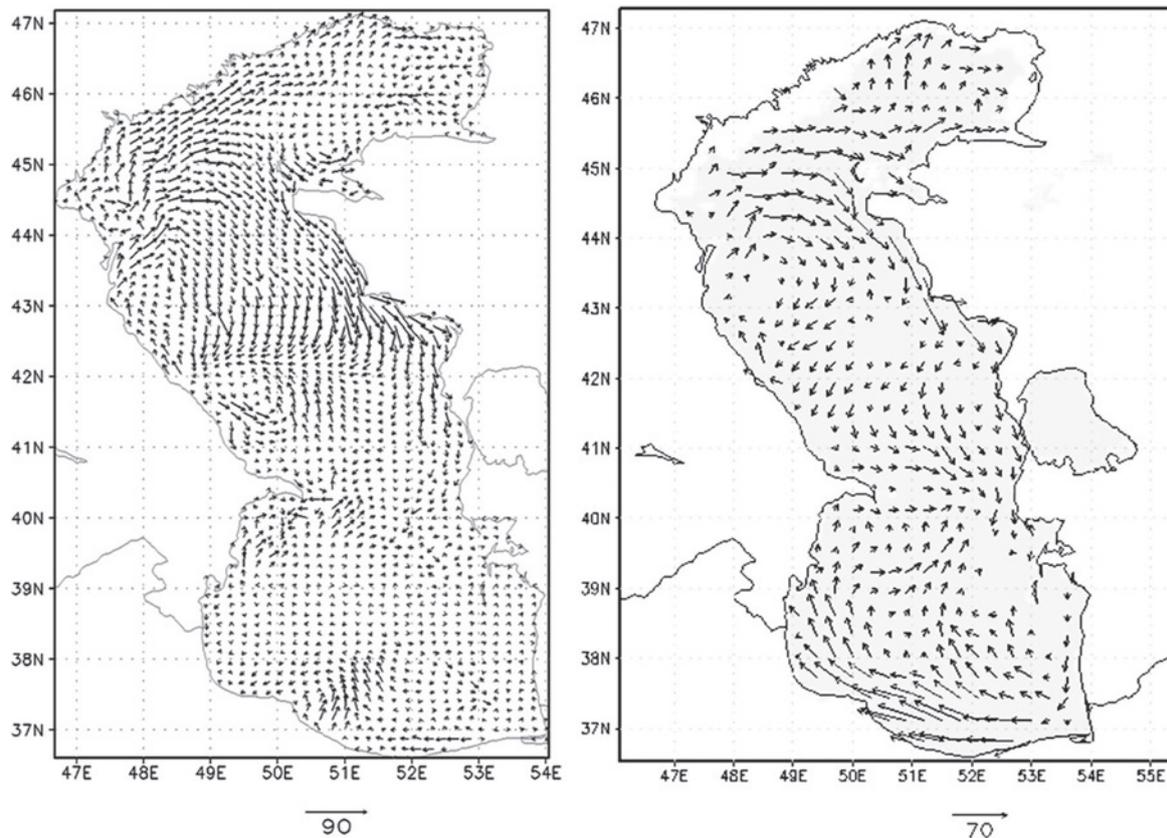


Рис. 3. Приповерхностные скорости течений по результатам расчета по модели INMOM (слева) и по ЕСИМО (справа) для 06.00UTC 15.01.2013 г.

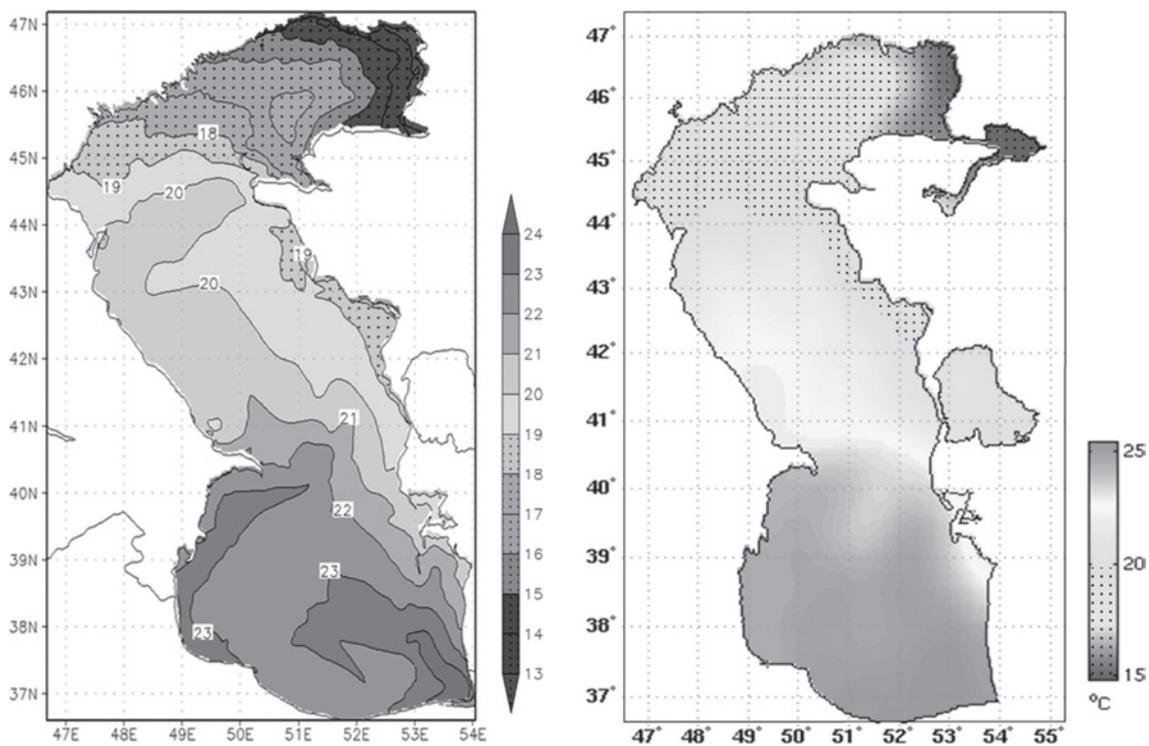


Рис. 4. Температура воды по результатам расчета по модели INMOM (слева) и по данным Гидрометцентра (справа) для 06.00UTC 09.10.2012 г.

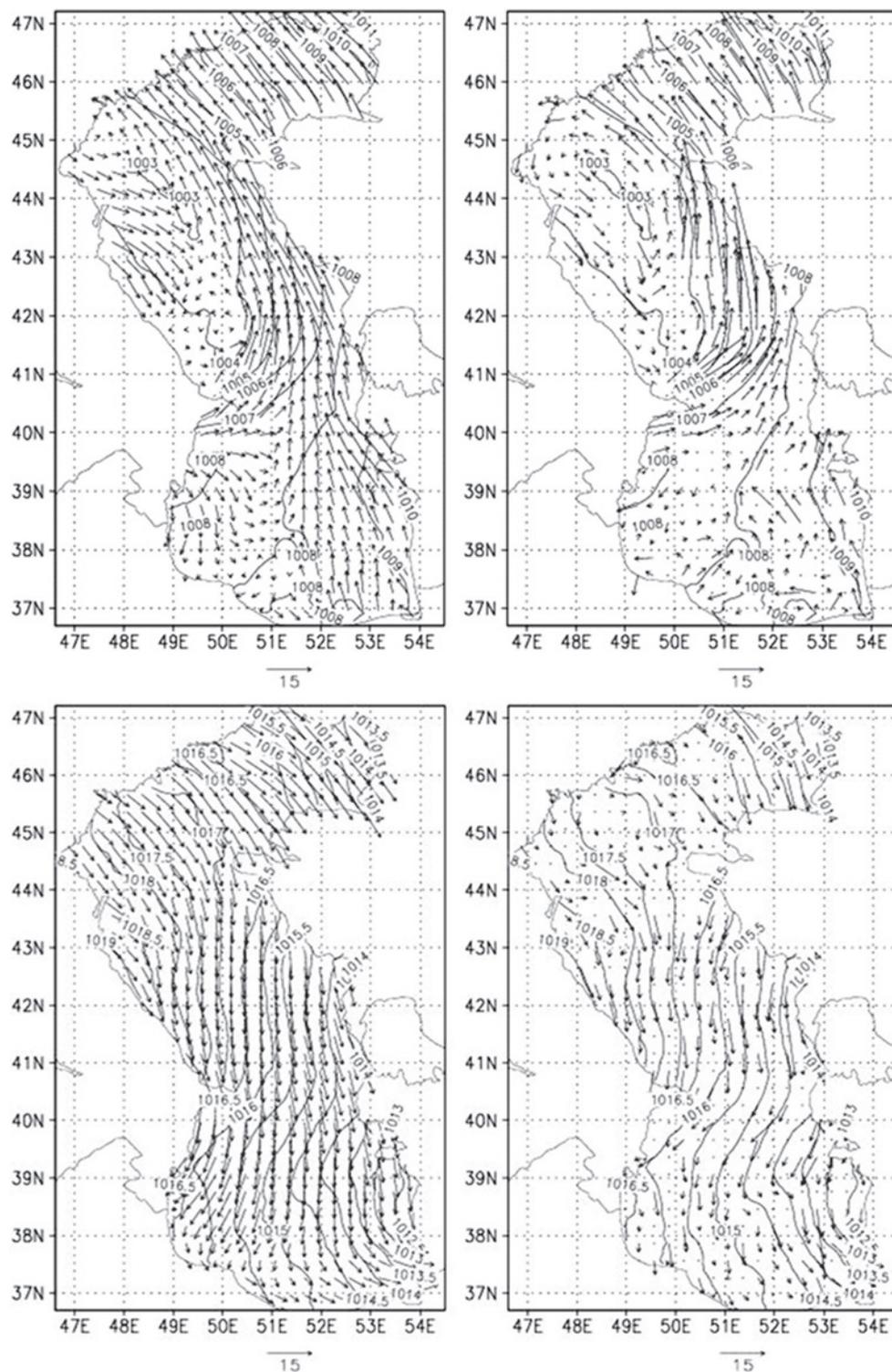


Рис. 5. Приповерхностное поле ветра по результатам расчета WRF (слева) и рассчитанное по формулам геострофического ветра по полю давления из той же модели WRF за срок 06.00UTC 09.10.2012 г. (сверху) и 06.00UTC 10.10.2012 г. (внизу). Масштаб стрелок в см/с показан внизу

моделирования для 06.00UTC 09.10.2012 г. и 06.00UTC 15.01.2013 г. (рис. 2 и 3 слева) в стандартной выдаче расчета СОДИП для Каспийского моря и из открытой базы данных ЕСИМО, рассчитанных по модели Гидрометцентра [Попов, Лобов, 2013]. Сравнение карт

течений по модели INMOM с картами ветровой циркуляции по результатам расчета Гидрометцентра на рис. 3 позволяет констатировать их хорошую согласованность и показывает, что основной вклад в циркуляцию вносят ветровые течения.

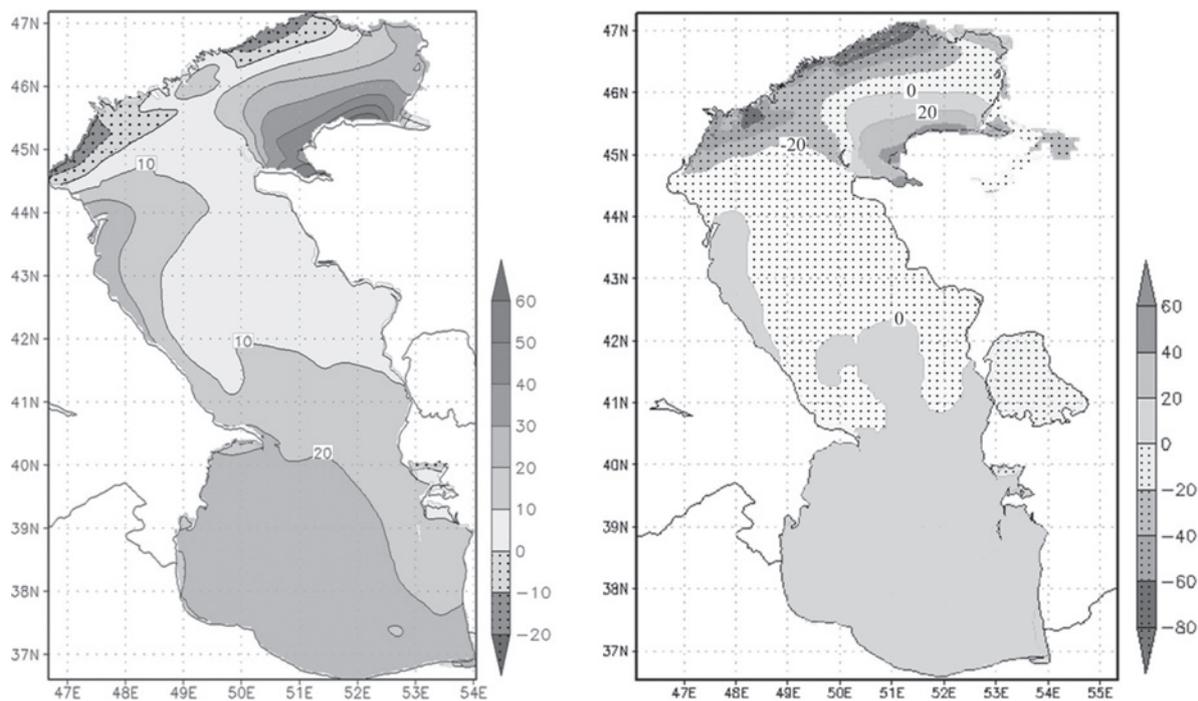


Рис. 6. Уровень моря по результатам расчета по модели INMOM и по данным Гидрометцентра для 06.00UTC 09.10.2012 г.

В октябре 2012 года в средней части Каспийского моря формировался обширный циклонический круговорот. С восточной стороны он образуется северным струйным течением, расположенным над склоном шельфа и простирающимся от центральной части Южного до Северного Каспия, и сопровождается вытянутым в северном направлении языком относительно теплой воды вдоль восточного берега моря (рис. 4). В Северном Каспии оно разворачивается к югу и следует к Апшеронскому полуострову в виде прибрежного течения. Севернее Апшеронского полуострова располагается циклонический вихрь, береговой сегмент которого составляет юго-западную периферию циклонического круговорота Северного Каспия. В Южном Каспии действует циклонический вихрь в северо-западной части и антициклонический – в центральной и южной глубоководных частях.

Система поверхностных течений моря изменчива, и отклик на изменение ветра может иметь всего несколько суток. Так, в январе 2013 г. направление ветра над морем привело к перестройке течений всего моря. В северной части Среднего Каспия сформировался антициклон. В центральной части течения южного направления сталкивались с северным течением, образуя слабое поверхностное течение вдоль западного берега и антициклонический вихрь севернее Апшеронского полуострова (рис. 3).

Обращает на себя внимание следующий факт. Если в Северном и Среднем Каспии течения, рассчитанные по разным моделям, имеют хорошее согласие, то в Южном Каспии наблюдается их существенное различие. По-видимому, это различие определяется ветровым воздействием. В СОДИП оно рассчитывается с помощью негидростатической модели WRF относительно высокого пространственного разрешения. В этом случае учитываются негидростатические эффекты, связанные с гористым рельефом, особенно важным для формирования ветрового поля в Южном Каспии. В модели Гидрометцентра для задания ветрового воздействия используется региональная гидростатическая модель Лосева [2010]. В этом случае приповерхностный ветер более сильно связан с приповерхностным давлением через геострофическое соотношение. На рис. 5 показаны приповерхностные поля ветра на 06.00UTC 09.10.2012 г. и 06.00UTC 10.10.2012 г., т. е. ровно через сутки, рассчитанные в модели WRF и по формулам геострофического ветра по полю давления из этой же модели. Из рисунка видно, что поля ветра, рассчитанные разным способом, хорошо согласованы в Среднем и Северном Каспии. Однако в Южном Каспии они существенно отличаются, что проявляется 06.00UTC 09.10.2012 г. Особенно это проявляется у восточного и южного берегов, когда ветер, рассчитанный в модели WRF, направлен поперек изобар.

Следует отметить резкую перестройку ветра, произошедшую за сутки. Сравнение карт ветра из рис. 5 с картами течений на рис. 2 показывает, что соответствующие поля течений и ветра связаны. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для Южного Каспия необходимо использовать для расчета ветра негидростатические модели атмосферы типа WRF или COSMO.

На рис. 6 показаны поля уровня моря для безледного периода на 06.00UTC 09.10.2012 г. по результатам моделирования. Большой интерес вызывает водообмен между Средним и Южным Каспием. Из этого рисунка видно, что вдоль восточного берега происходит вытекание вод из Среднего Каспия в Южный, а у противоположного берега, наоборот, проявляется втекание. Вытекание вод формируется северным течением. Это происходит не только в приповерхностном слое, но и в целом по глубине, о чем свидетельствует распределение уровня моря. При этом изменение уровня в Южном Каспии с повышением с востока на запад точно соответствует северному ветру за соответствующий срок, показанному на рис. 5.

Таким образом, модель INMOM вполне успешно воспроизводит динамику поверхностных циркуляционных течений в рамках работы системы СОДИП.

Выводы

Для акватории Каспийского моря разработан комплекс гидродинамических моделей, объединенных в единый расчетный комплекс, – система оперативного диагноза и прогноза (СОДИП). Она включает в себя расчет атмосферного воздействия по региональной негидростатической атмосферной модели WRF, расчет течений, уровня, температуры, солёности моря и морского льда по модели морской циркуляции INMOM и расчет параметров волнения по РАВМ.

Проведена верификация всех рассчитываемых с помощью СОДИП гидрометеохарактеристик для Каспийского моря по данным наблюдений на стационарных станциях. Сравнения ветра, температуры воды, солёности, течений и уровня моря показали высокую степень адекватности модельных расчетов и наблюдений. Это говорит о применимости СОДИП как для оперативных, так и для ретроспективных расчетов с целью определения режимов гидрометеорологических характеристик.

Воспроизведена структура циркуляции Каспийского моря за отдельные периоды с 2012 по 2013 г. Основу циркуляции Каспийского

моря составляют северное и южное течения, которые хорошо воспроизводятся моделью INMOM. Показано, что основной вклад в циркуляцию Каспийского моря делают ветровые течения. В частности, апвеллинг в восточной части Среднего Каспия обусловлен региональными ветрами северного направления, а ветровая природа северного течения вдоль восточного склона шельфа отражается в том, что температура воды играет роль трасера этого течения.

Показано, что вдоль восточного берега происходит вытекание вод из Среднего Каспия в Южный, а у противоположного берега, наоборот, проявляется втекание. Вытекание формируется северным течением. Это происходит не только в приповерхностном слое, но и в целом по глубине, о чем свидетельствует распределение уровня моря.

Установлено, что только в Южном Каспии наблюдается существенное различие течений, рассчитанных по разным моделям. Вероятно, это обусловлено ветровым воздействием. 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, но в Южном Каспии они существенно отличаются. Особенно это заметно у восточного и южного берегов, когда ветер, рассчитанный в WRF, направлен поперек изобар. Показано, что поля ветра и течений связаны. Следовательно, можно сделать вывод о том, что для Каспийского моря необходимо использовать для расчета ветра негидростатические модели атмосферы типа WRF или COSMO. Особенно это актуально для Южного Каспия.

Авторы выражают признательность А. В. Григорьеву за предоставленные данные, а также С. К. Попову за полезные консультации при подготовке статьи.

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН при финансовой поддержке РФФ (грант № 14–17–00740).

Литература

Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.

Дианский Н. А., Фомин В. В., Жохова Н. В., Коршенко А. Н. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи // Известия РАН, ФАО. 2013. Т. 49, № 6. С. 664–675.

Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 128 с.

Ибраев Р. А., Курдюмов Д. Г. Чувствительность сезонной изменчивости циркуляции вод Каспийского моря к параметризации вертикального перемешивания в модели гидродинамики // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 6. С. 849–856.

Кабатченко И. М., Матушевский Г. В., Резников М. В., Заславский М. М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 61–71.

Кныш В. В., Ибраев Р. А., Коротаев Г. К., Инюшина Н. В. Сезонная изменчивость климатических течений Каспийского моря, восстановленных ассимиляцией климатической температуры и солёности в модели циркуляции вод // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 2. С. 251–265.

Лосев В. М. Региональная гидродинамическая модель Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 36–58.

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.

Зырянов В. Н. Гидродинамические основы формирования крупномасштабной циркуляции вод Каспийского моря. 1. Асимптотическая теория // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 6. С. 600–612.

Зырянов В. Н. Гидродинамические основы формирования крупномасштабной циркуляции вод Кас-

пийского моря. 2. Численные расчеты // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 1–15

Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, no. C1. P. 1537–1540.

Ibrayev R. A., Sarkisyan A. S., Trukhchev D. I. Seasonal variability of circulation in the Caspian Sea reconstructed from normal hydrological data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2001. Т. 37, no. 1. С. 96–98.

Ibrayev R. A., Özsoy E., Schrum C., Sur H. I. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea INTERACTION // Ocean Science. 2010. Т. 6, no. 1. С. 311–329.

Large W. G., Yeager S. G. The global climatology of an interannually varying air – sea flux // Climate Dynamics. 2009. Vol. 33. P. 341–364.

Pacanowski R. C., Philander S. G. H. Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // J. Phys. Oceanogr. 1981. Vol. 11. P. 1443–1451.

Skamarock A. Description of the Advanced Research WRF, Version 3 – NCAR Technical Notes, 2008.

Zakharov V. E., Zaslavskii M. M., Kabatchenko I. M. et al. Conceptually new wind-wave model. In: The wind-driven air-sea interface electromagnetic and acoustic sensing, wave dynamics and turbulent fluxes, Sydney, Australia, 1999. P. 159–164.

Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V. et al. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. Vol. 27, no. 1. P. 95–111.

Поступила в редакцию 12.02.2016

References

Diaskij N. A. Modelirovanie cirkuljacii okeana i issledovanie ego reakcii na korotkoperiodnyye i dolgo-periodnyye atmosferynye vozdeystviya [Ocean circulation modelling and investigation of its response to short- and long-period atmospheric forcing]. Moscow: PhysMathLit, 2013. 272 p.

Diaskij N. A., Fomin V. V., Zhokhova N. V., Korshenko A. N. Raschet techenii i rasprostraneniya zagryazneniya v pribrezhnykh vodakh Bol'shogo Sochi [Simulations of currents and pollution transport in the coastal waters of Big Sochi]. *Izvestiya RAN, FAO [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]*. 2013. Vol. 49, no. 6. P. 611–621.

Ibraev R. A. Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskikh processov v Kaspijskom more [Mathematical modelling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea]. Moscow: GEOS, 2008. 128 p.

Ibraev R. A., Kurdjumov D. G. Chuvstvitel'nost' sezonnoi izmenchivosti tsirkulyatsii vod Kaspijskogo morya k parametrizatsii vertikal'nogo peremeshivaniya v modeli gidrodinamiki [Sensitivity of seasonal variability of the Caspian Sea circulation to the parametrization of vertical mixing in a hydrodynamic model]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]*. 2003. Vol. 39, no. 6. P. 768–774.

Kabatchenko I. M., Matushevskii G. V., Reznikov M. V., Zaslavskii M. M. Modelirovanie vetra i voln pri vtorichnykh termicheskikh tsiklonakh na Chernom more [Numerical modelling of wind and waves in a secondary cyclone at the Black Sea]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 2001. No. 5. P. 45–53.

Knysh V. V., Korotaev G. K., Inyushina N. V., Ibrayev R. A. Sezonnaya izmenchivost' klimaticheskikh techenii Kaspijskogo morya, vosstanovlennykh assimilyatsiei klimaticheskoi temperatury i solenosti v modeli tsirkulyatsii vod [Seasonal variability of climatic currents in the Caspian Sea reconstructed by assimilation of climatic temperature and salinity into the model of water circulation]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]*. 2008. Vol. 44, no. 2. P. 236–249.

Losev V. M. Regional'naja gidrodinamicheskaja model' Gidrometcentra Rossii [Regional hydrodynamic model of the Hydrometeorological Center of Russia]. 80 let Gidrometcentru Rossii [The 80th anniversary of the Hydrometeorological Center of Russia]. Moscow: Triada LTD, 2010. P. 36–58.

Popov S. K., Lobov A. L. Modelirovanie prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti urovnja Kaspijskogo morja v 1948–1994 gg. [Modelling of spatial and

temporal variability of the Caspian Sea level in 1948–1994]. *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia]*. 2013. No. 350. P. 68–87.

Zyryanov V. N. *Gidrodinamicheskie osnovy formirovaniya krupnomasshtabnoi tsirkulyatsii vod Kaspiiskogo morya. 1. Asimptoticheskaya teoriya [Hydrodynamic basis of formation of large-scale water circulation in the Caspian Sea: 1. Asymptotic theory]. Vodnye resursy [Water Resources]*. 2015. Vol. 42, no. 6. P. 294–304.

Zyryanov V. N. *Gidrodinamicheskie osnovy formirovaniya krupnomasshtabnoi tsirkulyatsii vod Kaspiiskogo morya. 2. Chislennyye raschety [Hydrodynamic basis of formation of large-scale water circulation in the Caspian Sea: 2. Numerical simulation]. Vodnye resursy [Water Resources]*. 2016. Vol. 43, no. 2. P. 1–15

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. Vol. 104, no. C1. P. 1537–1540.

Ibrayev R. A., Sarkisyan A. S., Trukhchev D. I. Seasonal variability of circulation in the Caspian Sea reconstructed from normal hydrological data. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2001. Vol. 37, no. 1. C. 96–98.

Ibrayev R. A., Özsoy E., Schrum C., Sur H. I. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea INTERACTION. *Ocean Science*. 2010. Vol. 6, no. 1. P. 311–329.

Large W. G., Yeager S. G. The global climatology of an interannually varying air – sea flux. *Climate Dynamics*. 2009. Vol. 33. P. 341–364.

Pacanowski R. C., Philander S. G. H. Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 1981. Vol. 11. P. 1443–1451.

Skamarock A. Description of the Advanced Research WRF, Version 3 – NCAR Technical Notes, 2008.

Zakharov V. E., Zaslavskii M. M., Kabatchenko I. M., Matushevskii G. V., Polnikov V. G. Conceptually new wind-wave model. In: The wind-driven air-sea interface electromagnetic and acoustic sensing, wave dynamics and turbulent fluxes, Sydney, Australia, 1999. P. 159–164.

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 Modeling*. 2012. Vol. 27, no. 1. P. 95–111.

Received February 12, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Дианский Николай Ардалинович

ведущий научный сотрудник, доцент, д. ф.-м. н.
Государственный океанографический институт
им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034

Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333

Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nikolay.diansky@gmail.com
тел.: +79268206665

Фомин Владимир Васильевич

научный сотрудник
Государственный океанографический институт
им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034

Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: lihar_89@mail.ru
тел.: +79057979412

Выручалкина Татьяна Юрьевна

научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

CONTRIBUTORS:

Diansky, Nikolai

N. N. Zubov State Oceanographic Institute
6 Kropotkinskii per., 119034 Moscow, Russia

Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nikolay.diansky@gmail.com
tel.: +7926 8206665

Fomin, Vladimir

N. N. Zubov State Oceanographic Institute
6 Kropotkinskii per., 119034 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lihar_89@mail.ru
tel.: +79057979412

Vyruchalkina, Tatiana

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences
3 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

эл. почта: vyruchi@list.ru
тел.: +74991355374

Гусев Анатолий Владимирович
научный сотрудник, к. ф. -м. н.
Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333

Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: anatoly.v.gusev@gmail.com
тел.: +79032467187

e-mail: vyruchi@list.ru
tel.: +74991355374

Gusev, Anatoly
Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com
tel.: +79032467187