

УДК [551.461+551.466.75].001.572(268.45+268.46)

## Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года

*С.К. Попов, А.Л. Лобов*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
lmpi@yandex.ru*

Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря с заблаговременностью 48 ч рассчитывались по трехмерной гидродинамической модели два раза в сутки в сроки 00 и 12 ч в течение 9 месяцев (март – ноябрь) 2017 г. по заданному на поверхности моря динамическому атмосферному воздействию (ветер и давление). Использовался шаг сетки в 0,5 морских миль с заданием атмосферного форсинга с шагом сетки 7 км по модели COSMO из архивной базы данных LM17 Гидрометцентра России. Построены графики временного хода уровня моря по наблюдениям и прогнозам для каждого из 9 месяцев на четырех береговых станциях. Получены оценки качества прогнозов уровня моря с использованием данных измерений уровня моря с шагом 6 ч на четырех береговых станциях. Результаты сравнения прогнозов уровня моря с наблюдениями показали, что модель успешно воспроизводит временной ход уровня моря и удовлетворяет требованиям Росгидромета, предъявляемым к точности прогнозов уровня моря на станциях Таганрог и Ейск.

*Ключевые слова:* прогнозы, заблаговременность, уровень моря, численная гидродинамическая модель, нагон, сгон, абсолютная ошибка, оправдываемость, коэффициент корреляции

## Short-term forecasts of the Azov Sea level variations during the iceless period in 2017

*S.K. Popov, A.L. Lobov*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
lmpi@yandex.ru*

Short-range forecasts of the Azov Sea level fluctuations with a lead time of 48 hours are calculated using a three-dimensional hydrodynamic model twice a day at 00:00 and 12:00 for 9 months (March-November) in 2017 according to the dynamic atmospheric forcing (wind and pressure) specified on the sea surface. The model grid spacing of 0.5 nautical miles was used with a prescribed atmospheric forcing with a grid spacing of 7 km using the COSMO model from the LM17 archive database of the Hydrometeorological Center of Russia. Graphs of temporal variations in the sea level were obtained from observations and forecasts for each of 9 months at four coastal stations. The estimates of the sea level forecast skill were obtained using data of 6-hour sea level measurements at four coastal stations. The results of the comparison of sea level forecasts with observations showed that the model successfully simulates temporal variations in the sea level and satisfies the Roshydromet requirements for the accuracy of sea level forecasts at Taganrog and Yeisk stations.

*Keywords:* Forecasts, lead time, sea level, numerical hydrodynamic model, upsurge, downsurge, absolute error, accuracy, correlation coefficient

## Введение

Численное гидродинамическое моделирование колебаний уровня Азовского моря с использованием двумерных моделей началось с работ И.Ф. Кириллова [5], С.Н. Овсиенко [6]. Первой трехмерной моделью Азовского моря является модель Ю.Г. Филиппова [15]. В дальнейшем происходило развитие и совершенствование гидродинамического моделирования штормовых нагонов Азовского моря [14], в том числе с использованием трехмерной модели [7]. В настоящее время численные модели расчета уровня Азовского моря продолжают развиваться и совершенствоваться [16, 17]. В новых работах, посвященных моделированию штормовых нагонов, используются новые, оригинальные численные схемы для решения двумерных уравнений мелкой воды [23].

Трехмерная полная модель морей, воспроизводящая гидротермодинамику Черного и Азовского морей и включающая расчет льда, использовалась для расчета экстремальных штормовых нагонов в Азовском море в 2013 и 2014 гг. [18], причем для Азовского моря использовалась очень подробная расчетная сетка с шагом 250 м. Особенностью и преимуществом данной модели является использование  $\sigma$ -системы координат, позволяющей проводить расчеты при больших колебаниях уровня моря.

В большинстве численных моделей в  $z$ -системе координат колебания уровня моря не должны выходить за пределы верхнего расчетного слоя. При больших колебаниях уровня моря это ограничение приводит к большой толщине верхнего расчетного слоя. Проблеме моделирования динамики океана при больших колебаниях уровня посвящена работа [4], где предлагается верхние несколько десятков метров океана описывать в  $\sigma$  координатной системе, а остальную часть толщи воды – в  $z$ -координатах.

Проблема моделирования больших нагонов Азовского моря в  $z$ -координатах исследовалась в [7]. Для моделирования штормовых нагонов использовалась трехмерная модель с переменным по времени числом вертикальных расчетных слоев в каждой расчетной точке Азовского моря. Число слоев в этой модели на каждом временном шаге определялось положением уровня моря и изменялось по времени. Уровень моря в процессе расчета штормового нагона попадал в различные расчетные слои, границы которых не изменялись по времени. Никаких ограничений на изменения уровня моря эта модель не накладывает, что позволяет моделировать большие колебания уровня моря с использованием расчетных слоев одинаковой толщины, без условия задания большой толщины верхнего слоя, необходимого при фиксированном количестве  $z$ -слоев. Необходимость вычисления количества слоев, определяемого колебаниями уровня моря на каждом шаге по времени, приводит к увеличению машинного времени счета, что являлось основным ограничением использования модели в 1995 году. Возможно, что в будущем для более точного расчета штормовых

нагонов будет использоваться модель с переменным по времени числом вертикальных расчетных слоев в каждой точке горизонтальной плоскости.

В Гидрометцентре России создана оперативная модель для прогноза уровня и течений в Азовском море. Прогнозы уровня моря по модели с разрешением 0,5 морских миль (NM – nautical mile) с использованием атмосферного форсинга по модели COSMO (7 км) [2] позволили предсказать время наступления и величину максимума уровня моря в катастрофическом наводнении 24 сентября 2014 года. Максимум уровня моря по наблюдениям составил 251 см, а по расчетам на 0,5 NM сетке – 249 см [11].

Весной 2015 года модель была внедрена в систему АСООИ Гидрометцентра России. Два раза в сутки после окончания работы модели COSMO запускается на счет модель Азовского моря, которая использует атмосферные данные из оперативной базы LM17. В базу данных AZOV в системе АСООИ Гидрометцентра России 2 раза в сутки поступают прогнозы уровня моря с дискретностью 1 час на 14 береговых станциях Азовского моря, а также ежечасные поля уровня на всей 0,5 NM сетке Азовского моря в течение 48 часов прогноза. Прогностический уровень моря на береговых станциях Азовского моря используется в отделе морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России, а также ежедневно передается в Северо-Кавказское УГМС.

Численная гидродинамическая модель Азовского моря применялась для диагностического расчета колебаний уровня моря в течение 6 месяцев (июнь – ноябрь) 2015 года и 3 месяцев (март – май) 2016 года. Модель в диагностическом режиме успешно воспроизвела колебания уровня Азовского моря [12]. Целью настоящей работы является детальная верификация прогнозов уровня Азовского моря по оперативной модели с использованием 48-часовых прогнозов атмосферной модели COSMO из архивной базы LM17.

### **Трехмерная гидродинамическая модель для расчета уровня моря и течений**

Используется трехмерная гидродинамическую модель, которая успешно применялась для расчета уровня в Баренцевом, Каспийском и Балтийском морях [1, 3, 8–10]. Модель основана на системе уравнений геофизической гидродинамики со свободной поверхностью в приближении гидростатики и Буссинеска в декартовой системе координат. Начало координат совпадает с невозмущенной поверхностью моря. Ось  $z$  направлена вертикально вверх, оси  $x$  и  $y$  направлены, соответственно, на восток и север.

Движение в море вызывается заданными на поверхности моря градиентом атмосферного давления и касательным напряжением трения ветра, которое зависит от скорости ветра. Зависимость эта квадратичная с коэффициентом, который называется коэффициентом сопротивления и также

зависит от скорости ветра [22]. Градиенты давления на уровне моря задаются в правой части уравнений движения модели. Используется баротропная версия модели, в которой плотность воды полагается постоянной.

В модели учитываются стоки рек Дон и Кубань, которые задаются в замыкающих створах. В месте впадения рек задается скорость течения воды по нормали к жидкой границе.

Для перехода к конечно-разностному представлению задана прямоугольная сеточная область в декартовой системе с равномерным шагом 0,5 NM ячеек сетки. Для задания компонентов скоростей и уровня моря используется разнесенная сетка  $S$  [19], для которой задаваемые в модели условия непротекания и свободного скольжения на боковых границах являются естественными. Верхняя граница ячеек сетки изменяется во времени, а нижняя зафиксирована и определяется рельефом дна. Шаг сетки по вертикали переменный. Число горизонтов определяется глубиной и изменяется по акватории от единицы (в этом случае верхняя и нижняя ячейки совпадают) до 12 – максимального числа горизонтов модели.

Колебания уровня моря ограничены верхним расчетным слоем, невозмущенная толщина которого равна 2,5 м в тех точках, где глубина моря больше 2,5 м. Если глубина моря меньше, чем 2,5 м, то в этой точке только один расчетный слой и его толщина определяется глубиной. Минимальная глубина Азовского моря и, соответственно, минимальная невозмущенная толщина верхнего слоя составляет 0,1 м. Невозмущенные толщины остальных расчетных слоев равны 1 м.

По времени используется явная схема Эйлера со сдвигом, когда скорости течений определяются на целом, а уровень на полуцелом шагах по времени, за исключением неявной аппроксимации процесса вертикального турбулентного обмена. Кориолисовы члены, аналогично [14], аппроксимируются полунеявным образом. Шаг по времени 40 с.

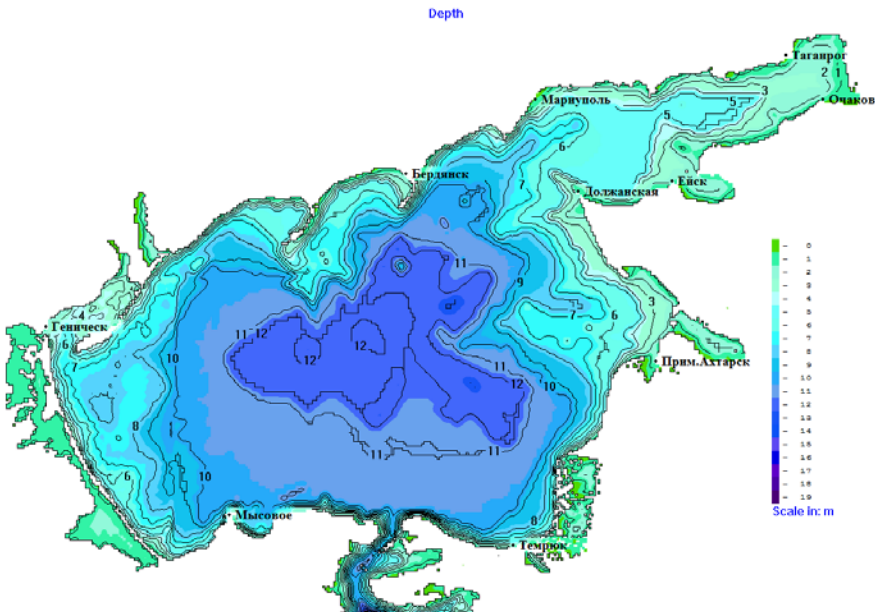
В модели, аналогично [21], используется не постоянная, а переменная по пространству толщина придонной ячейки, которая зависит от глубины места. В придонных ячейках толщина постоянна по времени, но различна по пространству, что позволяет более точно описывать топографию дна. От топографии дна зависит скорость движения нагонной волны и время наступления пика нагона. Придонное трение зависит от величины придонной скорости течения, что является преимуществом трехмерной модели по сравнению с двухмерными моделями уравнений мелкой воды, где придонное трение зависит от средней по толщине воды скорости течения. Сочетание подробного описания рельефа дна с более точной, чем в двумерных моделях, аппроксимацией придонного трения в конечном итоге приводит к более точному воспроизведению скорости движения поверхностной гравитационной волны, что дает хорошее совпадение по времени с наблюдаемыми пиками наступления наводнения.

В модели используется алгоритм учета осушения и затопления, который успешно применялся при расчетах штормовых нагонов в Каспийском море [3].

Программа расчета представляет собой реализацию решения системы дифференциальных уравнений в частных производных с помощью конечных разностей. Текст программы написан на языке FORTRAN. Программа поддерживает распараллеливание в модели общей памяти с помощью технологии OpenMP [8].

Входными данными для модели являются поля давления и ветра на высоте 10 м по данным метеорологического прогноза COSMO [2] с разрешением примерно 7 км по горизонтали. Исходные поля ветра и давления интерполируются по пространству с сетки атмосферной модели COSMO на модельную 0,5 NM сетку, при этом применяется интерполяция по пространству, взятая из [20]. Поля ветра и давления уже на модельной сетке линейно интерполируются по времени, чтобы получить поля на каждом модельном шаге по времени. Выходными данными являются трехмерное поле скоростей течений и уровень Азовского моря с разрешением по горизонтали 926 м.

В настоящее время действует главная высотная основа СССР 1977 г. (ГВО СССР). На рис. 1 представлена батиметрия Азовского моря относительно нуля Кронштадтского футштока (ГВО СССР). За единый нуль постов Азовского моря с 1961 года принята отметка, равная 5 м БС. Чтобы привести наблюдения к 0 м БС, нужно отнять от наблюдаемого уровня 5 м. В дальнейшем под термином уровень моря следует понимать отклонение уровня моря от нуля Кронштадтского футштока.



**Рис. 1.** Батиметрия Азовского моря.  
**Fig. 1.** Bathymetry of the Azov Sea.

### Наблюдения и прогнозы уровня Азовского моря в течение 9 месяцев (март – ноябрь) 2017 года

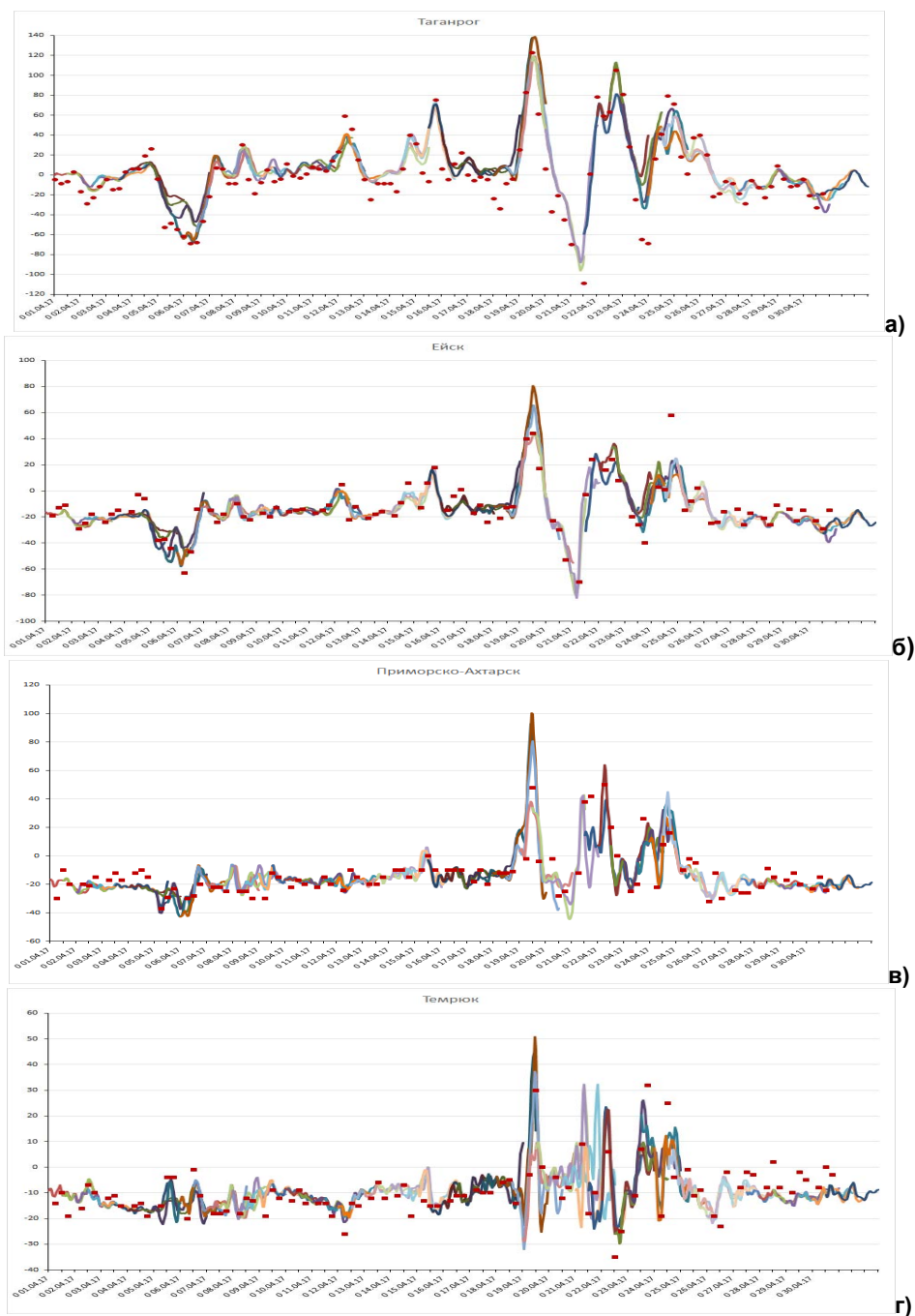
Численная гидродинамическая модель Азовского моря стартовала в сроки 00 и 12 ч ежедневно в течение марта – ноября 2017 года. На поверхности моря задавались прогнозы атмосферного воздействия (ветер и давление) с заблаговременностью 48 ч, которые хранятся в архивной базе LM17 модели COSMO в системе АСОИИ Гидрометцентра России. В качестве начальных данных для каждого прогноза задается двумерное поле уровня моря и трехмерное поле скорости течения. В начале расчета поле уровня моря было задано постоянным и равным нулю по всей площади моря, начальные скорости течений также равны нулю.

Начальное модельное поле уровня для каждого прогноза на 48 ч не корректируется наблюдениями за уровнем моря и представляет собой полученное в предыдущем прогнозе и сохраненное на 12 ч расчетное поле уровня моря. После расчета первого прогноза полученное на 12 ч поле уровня моря и скорости течений использовалось в качестве начального условия для второго прогноза и так далее в течение непрерывного периода расчетов. Модель при расчете каждого прогноза стартует с начальных полей уровня моря, оправдываемость которых ниже 100 %, поскольку начальные поля не совпадают с наблюдениями и никак не корректируются по наблюдениям. Прогноз уровня моря считается на основе данных предыдущего прогноза. Хотя сами прогнозы всего на 48 ч – краткосрочные, но поскольку начальные данные – это тоже предыдущий прогноз без коррекции наблюдениями, то получается прогноз на прогнозе, и в итоге – долгосрочный прогноз в течение всего непрерывного периода расчетов по модели.

Но если произошел сбой и прогнозы атмосферной модели COSMO отсутствуют, то морская модель не запускается на счет и период непрерывного расчета по модели заканчивается. Старт прогноза по морской модели в следующий срок происходит не с полей предыдущего прогноза, а с нулевых полей уровня моря и скорости течения. После старта с нулевых начальных полей происходит подстройка уровня моря и скорости течения к заданным на поверхности скорости ветра и давлению, и в это время возможны большие ошибки, связанные с ошибкой в задании начального нулевого поля уровня моря, не соответствующего наблюдаемому.

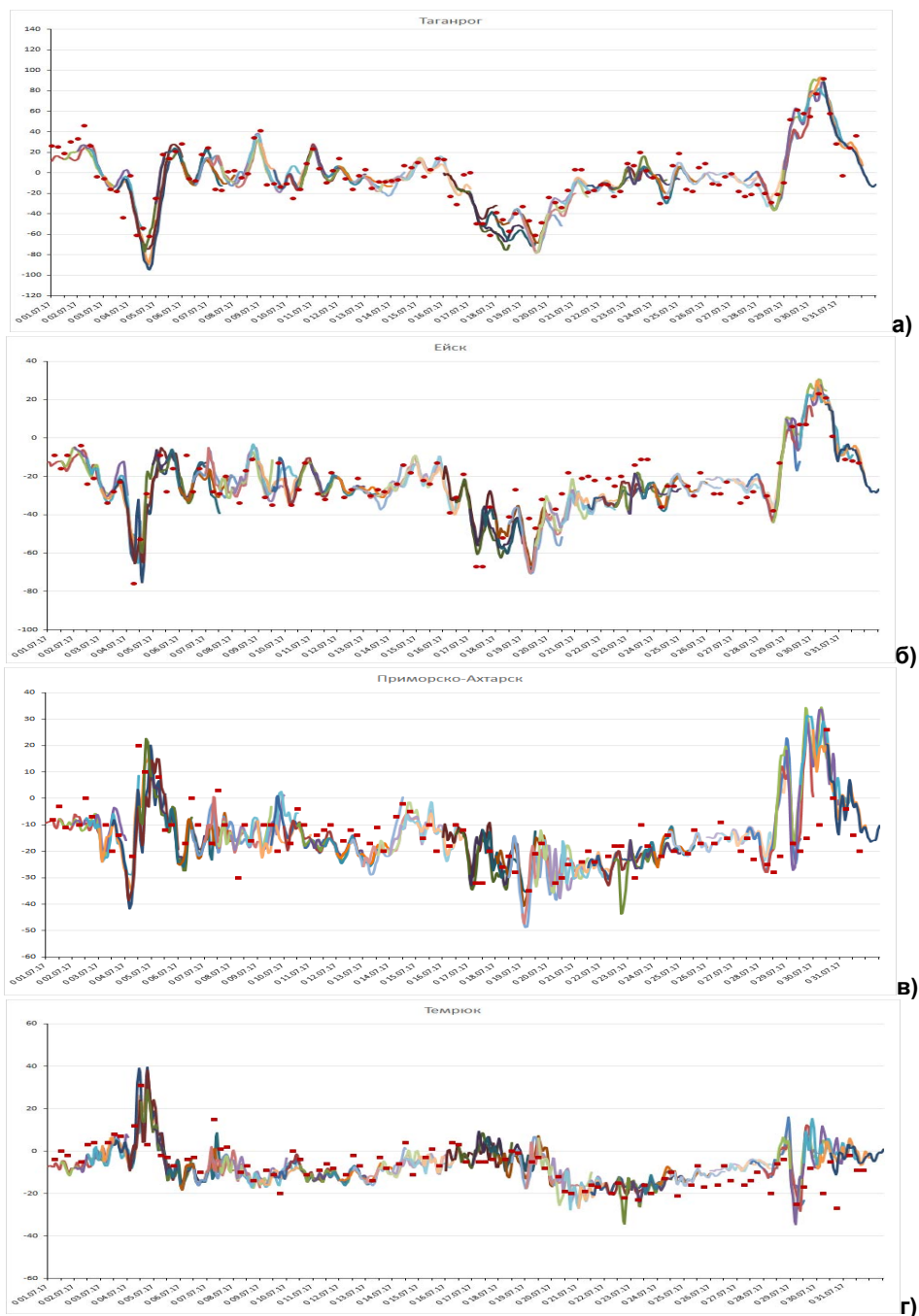
Наблюдения за уровнем моря поступают 4 раза в сутки в 0, 6, 12, 18 ч только на станции Таганрог, на остальных станциях наблюдения поступают 3 раза в сутки в 6, 12 и 18 часов.

На рис. 2–4 приводится уровень моря на станциях Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Темрюк для апреля, июля и октября 2017 года. Для каждого месяца представлены 60 или 62 прогноза на 48 ч (30 или 31 сутки по 2 прогноза в сутки) и наблюдения за уровнем моря. Красные точки – наблюдения, цветные линии – прогнозы на 48 ч. Каждый 48-часовой прогноз имеет разный цвет.



**Рис. 2.** Уровень моря на станциях Таганрог (а), Ейск (б), Приморско-Ахтарск (в), Темрюк (г), апрель 2017г.

**Fig. 2.** Sea level at Taganrog (a), Yeisk (б), Primorsko-Akhtarsk (в), Temryuk (г) stations, April 2017



**Рис. 3.** Уровень моря на станциях Таганрог (а), Ейск (б), Приморско-Ахтарск (в), Темрюк (г), июль 2017 г.

**Fig. 3.** Sea level at Taganrog (a), Yeysk (б), Primorsko-Akhtarsk (в), Temryuk (г) stations, July 2017





**Рис. 4.** Уровень моря Таганрог (а), Ейск (б), Приморско-Ахтарск (в), Темрюк (г), октябрь 2017 г.

**Fig. 4.** Sea level at Taganrog (a), Yeisk (б), Primorsko-Akhtarsk (в), Temryuk (г) stations, October 2017.

Для мая, июня, августа в архивной базе LM17 прогнозов по модели COSMO не было пропусков, поэтому для этих месяцев все прогнозы рассчитаны 2 раза в сутки, всего 60 прогнозов (30 суток), или 62 прогноза (31 сутки).

Для марта отсутствуют два прогноза COSMO: 1 марта в 00 и 12 ч. Для апреля отсутствует один прогноз COSMO: 20 апреля в 12 ч. Для июля отсутствуют три прогноза COSMO: 25 июля в 00 и 12 ч и 15 июля в 12 ч. Для сентября отсутствуют два прогноза COSMO: 28 сентября в 00 ч и 27 сентября в 12 ч. Для октября отсутствуют 9 прогнозов COSMO: 2 октября в 00 и 12 ч, 4 октября в 00 и 12 ч, 6 октября в 00 и 12 ч.

### Статистические оценки точности прогнозов уровня моря по наблюдениям

В табл. 1–4 указаны максимальное  $\max_n$  и минимальное  $\min_n$  значение уровня моря по данным наблюдений;  $\sigma_n$  – среднеквадратическое отклонение наблюдений от среднего; максимальное  $\max_m$  и минимальное  $\min_m$  значение уровня моря по модели;  $\sigma_m$  – среднеквадратическое отклонение расчетов от среднего;  $A$  – абсолютная ошибка расчетов;  $O, \%$  – относительная ошибка расчетов;  $\sigma$  – среднеквадратическая ошибка расчетов;  $P, \%$  – процент расчетов, не выходящих за предел  $<0,674\sigma_n$ , т. е. оправдываемость расчета в процентах [13];  $R$  – коэффициент корреляции между данными наблюдений и моделирования.

### Заключение

Прогностические расчеты уровня Азовского моря по модели с разрешением 0,5 морских миль с использованием атмосферного форсинга по модели COSMO (7 км) выполнялись два раза в сутки в сроки 00 и 12 ч в течение 9 месяцев. В работе сопоставлены результаты прогнозов по модели с наблюдениями и приведены графики временного хода уровня моря по расчетам и наблюдениям. Получены статистические оценки точности модельных прогнозов уровня моря.

Если оценивать успешность работы модели по величине среднего за 9 месяцев коэффициента корреляции, то береговые станции Азовского моря расположены следующим образом: Таганрог 0,89, Ейск 0,88, Приморско-Ахтарск 0,69, Темрюк 0,69.

По величине средней за 9 месяцев относительной ошибки: Таганрог 5,9 %, Ейск 7,0 %, Темрюк 8,9 %, Приморско-Ахтарск 10,6 %.

По величине средней за 9 месяцев абсолютной ошибки Темрюк 5,2 см, Ейск 7,4 см, Приморско-Ахтарск 7,9 см, Таганрог 12,3 см.

По величине средней за 9 месяцев среднеквадратической ошибки Темрюк 7,3 см, Ейск 9,8 см, Приморско-Ахтарск 10,7 см, Таганрог 17,7 см.

По величине средней за 9 месяцев оправдываемости прогнозов Таганрог 87,5 %, Ейск 83 %, Темрюк 73,1 %, Приморско-Ахтарск 69,6 %.

**Таблица 1.** Оценка точности прогноза уровня моря на станции Таганрог в 2017 г.  
**Table 1.** Estimation of accuracy of sea level forecast at Taganrog station in 2017

	max <sub>н</sub>	min <sub>н</sub>	$\sigma_{н}$	max <sub>м</sub>	min <sub>м</sub>	$\sigma_{м}$	A, см	O, %	$\sigma_{с}$	P, %	R
Март	146	-95	39,4	120	-118	40	11	4,4	14,6	90	0,93
Апрель	123	-129	40,3	127	-82	32	13	5,1	18,5	88,7	0,89
Май	46	-125	27,6	43	-110	21,9	10	6,1	14,2	83,3	0,87
Июнь	100	-106	30,7	102	-56	24,7	12	5,9	18,3	86,9	0,8
Июль	92	-62	30,5	89	-87	29,2	9,5	6,2	12	92,5	0,92
Август	18	-110	25,1	39	-112	32,4	11	8,8	13,5	80	0,92
Сентябрь	53	-178	53	29	-207	58,6	13	5,5	25,7	93,5	0,91
Октябрь	142	-158	44,4	148	-168	49,2	19	6,3	25,8	82,7	0,85
Ноябрь	94	-156	41,2	130	-175	51,1	12	4,8	17	89,7	0,95
Среднее	90	-124	36,9	91,9	-123,9	37,7	12,3	5,9	17,7	87,5	0,89

**Таблица 2.** Оценка точности прогноза уровня моря на станции Ейск в 2017 г.  
**Table 2.** Estimation of accuracy of sea level forecast at Yeisk station in 2017

	max <sub>н</sub>	min <sub>н</sub>	$\sigma_{н}$	max <sub>м</sub>	min <sub>м</sub>	$\sigma_{м}$	A, см	O, %	$\sigma_{с}$	P, %	R
Март	53	-67	20,3	51	-75	20,7	5,8	4,9	8	88,3	0,93
Апрель	58	-70	19,9	81	-52	18,4	6,8	5,3	10,1	91,1	0,86
Май	15	-70	14	15	-77	11,7	6	7,1	7,5	80	0,85
Июнь	24	-47	12,4	32	-61	12,9	6	8,5	7,8	74,4	0,81
Июль	23	-76	15,9	28	-69	16	7,2	7,3	9,3	74,1	0,83
Август	-15	-87	16,1	-8	-94	19,5	7	9,8	8,8	78,9	0,91
Сентябрь	-2	-133	32,2	-12	-148	32,1	8,1	6,2	10,1	94,6	0,96
Октябрь	53	-102	26,4	68	-125	27,8	11	7,4	15,3	82,7	0,84
Ноябрь	35	-83	20,8	69	-104	28,6	7,9	6,7	11,4	82,8	0,95
Среднее	27	-82	19,8	36,0	-89,4	20,9	7,4	7,0	9,8	83,0	0,88

**Таблица 3.** Оценка точности прогноза уровня моря на станции Приморско-Ахтарск в 2017 г.

**Table 3.** Estimation of accuracy of sea level forecast at Primorsko-Akhtarsk station in 2017

	max <sub>н</sub>	min <sub>н</sub>	$\sigma_{н}$	max <sub>м</sub>	min <sub>м</sub>	$\sigma_{м}$	A, см	O, %	$\sigma_{с}$	P, %	R
Март	10	-50	13,3	14	-49	11,1	6,4	10,6	8,2	74,4	0,79
Апрель	50	-37	16,8	100	-42	16,9	7,4	8,5	10,9	78	0,79
Май	10	-30	8,3	13	-37	6,5	6,9	17,2	8,9	50,6	0,3
Июнь	29	-35	9,6	25	-29	7,6	6,3	9,8	7,9	63,7	0,61
Июль	26	-35	10,5	34	-35	11,5	7,3	12	10,4	63,8	0,56
Август	-2	-60	13	4	-69	14,1	7,9	13,6	10,6	67,2	0,69
Сентябрь	-5	-105	21,1	2	-104	22,2	8,7	8,7	12,5	85,7	0,84
Октябрь	60	-80	19,7	57	-82	22,1	11	8,2	14,5	68,5	0,77
Ноябрь	40	-80	18,1	62	-85	20,7	8,7	7,2	12	74,7	0,82
Среднее	10	-50	13,3	14	-49	11,1	6,4	10,6	8,2	74,4	0,79

**Таблица 4.** Оценка точности прогноза уровня моря на станции Темрюк в 2017 г.  
**Table 4.** Estimation of accuracy of sea level forecast at Temryuk station in 2017

	max <sub>н</sub>	min <sub>н</sub>	$\sigma_{н}$	max <sub>м</sub>	min <sub>м</sub>	$\sigma_{м}$	A, см	O, %	$\sigma_{с}$	P, %	R
Март	7	-41	8,3	5	-53	6,9	4,4	9,3	5,8	73,3	0,73
Апрель	32	-35	10,3	46	-26	8,6	5,2	7,8	7,7	77,4	0,68
Май	15	-27	7,8	21	-19	5,9	4,4	10,6	5,7	71,1	0,69
Июнь	10	-22	6,8	14	-20	6,2	3,9	12,3	4,9	65,5	0,73
Июль	31	-27	9,5	38	-27	9	5,9	10,1	8,1	67,2	0,62
Август	8	-35	7,7	3	-37	5,7	4,1	9,6	5,5	71,7	0,72
Сентябрь	16	-104	13,5	7	-49	7	6	5	11,5	84,5	0,53
Октябрь	18	-58	11,7	17	-57	11,3	7,6	10	10,1	66	0,62
Ноябрь	38	-46	11,5	33	-56	12,1	4,9	5,8	6,5	81	0,85
Среднее	19	-44	9,7	20,4	-38,2	8,1	5,2	8,9	7,3	73,1	0,69

По критериям [13] оправдываемость расчетов получает оценку хорошо на станции Таганрог, удовлетворительно на станции Ейск, неудовлетворительно на станциях Приморско-Ахтарск и Темрюк. Неудовлетворительная оправдываемость на станциях Приморско-Ахтарск и Темрюк обусловлена очень маленькими значениями допустимой ошибки расчета, составляющей в среднем за 9 месяцев на станции Приморско-Ахтарск 9,7 см, а на станции Темрюк 6,5 см. На станции Таганрог средняя за 9 месяцев допустимая ошибка расчета составила 24,8 см, а на станции Ейск 13,3 см.

Модель хорошо воспроизводит изменения уровня моря, вызванные ветровым воздействием на поверхность моря. Но при слабых ветрах и отклик уровня моря на ветровое воздействие также слабый. При уменьшении скорости ветра, его роль в изменчивости уровня моря уменьшается и на первое место выходят термохалинные факторы, которые данной версией модели не воспроизводятся.

Анализ результатов показывает, что на станции Таганрог в летние месяцы оправдываемость прогнозов уровня моря выше или приблизительно равна средней оправдываемости за период расчетов, а на остальных станциях – ниже. Это объясняется высокими значениями допустимой ошибки расчета, вызванной изменчивостью уровня моря, которая на станции Таганрог выше, чем на других станциях. Модель, как уже было сказано, хорошо воспроизводит значительную изменчивость уровня моря и работает тем лучше, чем выше изменчивость уровня моря. В июле в Таганроге (табл. 1) оправдываемость  $P = 92,5\%$ ,  $\sigma_{н} = 30,5$  см; на станции Ейск (табл. 2)  $P = 74,1\%$ ,  $\sigma_{н} = 15,9$  см; на станции Приморско-Ахтарск (табл. 3)  $P = 63,8\%$ ,  $\sigma_{н} = 10,5$  см; на станции Темрюк (табл. 4)  $P = 67,2\%$ ,  $\sigma_{н} = 9,5$  см.

В сентябре качество прогноза на *всех* станциях максимально возможное, поскольку в сентябре максимальная за весь период расчетов изменчивость уровня моря, которая вызвана воздействием ветра и хорошо

воспроизводится моделью. В сентябре в Таганроге (табл. 1) оправдываемость  $P = 93,5 \%$ ,  $\sigma_n = 53$  см; на станции Ейск (табл. 2)  $P = 94,6 \%$ ,  $\sigma_n = 32,2$  см; на станции Приморско-Ахтарск (табл. 3)  $P = 85,7 \%$ ,  $\sigma_n = 21,1$  см; на станции Темрюк (табл. 4)  $P = 84,5 \%$ ,  $\sigma_n = 13,5$  см.

### Список литературы

1. Архипов Б.В., Попов С.К. Моделирование плотностных и ветровых течений в юго-восточной части Баренцева моря // *Океанология*. 1996. Т. 36, № 6. С. 805-813.
2. Вильфанд Р.М., Ривин Г. С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-Ru // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 1. С. 5-17.
3. Зильберштейн О.И., Попов С.К., Чумаков М.М., Сафронов Г.Ф. Метод расчета экстремальных характеристик уровня моря в Северном Каспии // *Водные ресурсы*. 2001. Т. 28, № 6. С. 692-700.
4. Ибраев Р.А., Дьяконов Г.С. Моделирование динамики океана при больших колебаниях уровня // *Известия РАН. ФАО*. 2016. Т. 52, № 4. С. 514-526.
5. Кириллов И.Ф. Опыт применения численного метода для расчета сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря // *Труды ГОИН*. 1964. Вып. 75.
6. Овсиенко С.Н. Расчет катастрофического нагона у юго-восточного побережья Азовского моря // *Труды Гидрометцентра СССР*. 1973. Вып. 127. С. 33-36.
7. Попов С.К. Трехмерная модель для расчета штормовых нагонов в Азовском море // *Труды ГОИН*. 1995. Юбилейный вып. 2. С. 205-214.
8. Попов С.К., Зильберштейн О.И., Лобов А.Л., Чумаков М.М. Моделирование сезонного хода уровня Каспийского моря с применением параллельных вычислений // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 12. С. 41-53.
9. Попов С.К., Лобов А.Л., Елисов В.В., Батов В.И. Прилив в оперативной модели краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Белом и Баренцевом морях // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 6. С. 68-82.
10. Попов С.К., Лобов А.Л. Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учетом работающей дамбы // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 4. С. 80-89.
11. Попов С.К., Лобов А.Л. Диагноз и прогноз наводнения в Таганроге по оперативной гидродинамической модели // *Труды Гидрометцентра России*. 2016. Вып. 362. С. 92-108.
12. Попов С.К., Лобов А.Л. Моделирование изменений уровня Азовского моря в 2015-2016 годах // *Труды Гидрометцентра России*. 2017. Вып. 364. С. 131-143.
13. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: Триада лтд, 2011. 188 с.
14. Тихонова О.В., Зильберштейн О.И., Сафронов Г.Ф. Гидродинамическое моделирование штормовых нагонов Азовского моря // *Труды ГОИН*. 1995. Юбилейный вып. 2. С. 215-223.
15. Филиппов Ю.Г. Об одном способе расчета морских течений // *Труды ГОИН*. 1970. Вып. 103. С. 87-94.

16. Филиппов Ю.Г. О влиянии стока р. Дон на уровень воды в Таганрогском заливе // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 2. С. 76-80.
17. Фомин В.В., Полозок А.А., Фомина И.В. Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // *Морской гидрофизический журнал*. Севастополь, 2015. № 1. С. 16-28.
18. Фомин В.В., Дианский Н.А. Расчет экстремальных штормовых нагонов в Таганрогском заливе с использованием морских и атмосферных моделей различного пространственного разрешения // *Метеорология и гидрология*. 2018 (в печати).
19. Arakawa A., Lamb V.R. A potential enstrophy and energy conserving scheme for shallow water equations // *Mon. Wea. Rev.* 1981. Vol. 109. P. 18-36.
20. Akima H. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points // *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1978. Vol. 4. P. 148-159.
21. Backhaus J.O. A three-dimensional model for the simulation of shelf-sea dynamics // *Dtsch. Hydrogr. Z.* 1985. Vol. 38. H4. P. 165-187.
22. Holthuijsen L.H., Powell M.D., Pietrzak J.D. Wind and waves in extreme hurricanes // *J. Geophys. Res.* Vol. 2012. Vol. 117. C09003, doi: 10.1029/2012JC007983.
23. Saburin D.S., Elizarova T.G. Modeling of the Azov Sea circulation and extreme surges in 2013-2014 with the use of regularized shallow water equations // *Rus. J. Num. Anal. Math. Model.* 2018. Vol. 33(3). P. 173-185, doi:10.1515/rnam-2018-0015.

### References

1. Arkhipov B. V., Popov S. K. Modeling of Density and Wind Currents in the South-eastern Part of the Barents Sea. *Oceanology*, 1996, vol. 36, no. 6, pp. 757-765
2. Vil'fand R. M., Rivin G. S., Rozinkina I. A. Mesoscale Weather Short-range Forecasting at the Hydrometcenter of Russia, on the Example of COSMO-RU. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 1, pp. 1-9, DOI: 10.3103/S1068373910010012.
3. Zil'bershtein O. I., Popov S. K., Chumakov M. M., Safronov G. F. A Procedure for Calculating Extreme Characteristics of the Northern Caspian Sea Level. *Water Resources*, 2001, vol. 28, no. 6, pp. 632-639.
4. Ibrayev R. A., Dyakonov G. S. Modeling of Ocean Dynamics with Large Variations in Sea Level. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 455-466. DOI: 10.1134/S000143381604006X
5. Kirillov I.F. Opyt primeneniya chislennogo metoda dlya rascheta sgonnonagonnykh kolebaniy urovnya Azovskogo morya. *Trudy GOIN [Proceedings of the State Oceanographic Institute]*, 1964, vol. 75. [in Russ.].
6. Ovsienko S.N. Raschet katastroficheskogo nagona u yugo-vostochnogo poberezh'ya Azovskogo morya. *Trudy Gidrometsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1973, vol. 127, pp. 33-36. [in Russ.].
7. Popov S.K. Trekhmernaya model' dlya rascheta schtormovykh nagonov v Azovskom more. *Trudy GOIN [Proceedings of the State Oceanographic Institute]*, 1995, vol. 2, pp. 205-214. [in Russ.].
8. Popov S. K., Zil'bershtein O. I., Lobov A. L., Chumakov M. M. Simulation of seasonal variations of the Caspian Sea level using parallel computations. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 12, pp 801-809, DOI: 10.3103/S106837390912005X.
9. Popov S. K., Lobov A. L., Elisov V. V., Batov V. I. A tide in the operational model for short-range forecast of current velocity and sea level in the Barents and White

seas. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 6, pp. 414–425, DOI: 10.3103/S106837391306006X.

10. *Popov S.K., Lobov A.L.* Hydrodynamic modeling of floods in Saint Petersburg considering the operating dam. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 4, pp. 267–274, DOI: 10.3103/S1068373917040070.

11. *Popov S.K., Lobov A.L.* Diagnosis and forecasts of flood in Taganrog with the help of an operational hydrodynamic model. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 362, pp. 92–108. [in Russ.].

12. *Popov S.K., Lobov A.L.* Modeling of the sea level changes of the Azov Sea in 2015–2016. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 364, pp. 131–143. [in Russ.].

13. RD 52.27.759–2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov, Razdel 3 CHast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. Moscow: Triada LTD publ., 2011, 188 p. [in Russ.].

14. *Tikhonova O.V., Zil'bershtein O.I., Safronov G.F.* Gidrodinamicheskoe modelirovanie shtormovykh nagonov Azovskogo moray. *Trudy GOIN [Proceedings of the State Oceanographic Institute]*, 1995, vol. 2, pp. 215–223. [in Russ.].

15. *Filippov Yu.G.* Ob odnom sposobe rascheta morskikh techeniy. *Trudy GOIN [Proceedings of the State Oceanographic Institute]*, 1970, vol. 103, pp. 87–94. [in Russ.].

16. *Filippov Yu.G.* The Impact of the Don River Runoff on the Water Level in the Taganrog Bay. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 2, pp. 127–130, DOI: 10.3103/S1068373915020090.

17. *Fomin V.V., Polozok A.A., Fomina I.N.* Simulation of the Azov Sea water circulation taking into account river flow. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal [Physical Oceanography]*, 2015, no. 1, pp. 15–26, DOI: 10.22449/1573-160X-2015-1-15-26.

18. *Fomin V.V., Diansky N.A.* Extreme surge simulations in the Taganrog bay with the use of ocean and atmosphere circulation models of various spatial resolution. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, no. 12 (in press).

19. *Arakawa A., Lamb V.R.* A potential enstrophy and energy conserving scheme for shallow water equations. *Mon. Wea. Rev.* 1981, vol. 109, pp. 18–36.

20. *Akima H.* A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. *ACM Transactions on Mathematical Software.*, 1978, vol. 4, pp. 148–159.

21. *Backhaus J.O.* A three-dimensional model for the simulation of shelf-sea dynamics. *Dtsch. Hydrogr. Z.* 1985, vol. 38, no. 4, pp. 165–187.

22. *Holthuijsen L.H., Powell M.D., Pietrzak J.D.* Wind and waves in extreme hurricanes. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, C09003, DOI: 10.1029/2012JC007983.

23. *Saburin D.S., Elizarova T.G.* Modeling of the Azov Sea circulation and extreme surges in 2013–2014 with the use of regularized shallow water equations. *Rus. J. Num. Anal. Math. Model.*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 173–185, DOI:10.1515/rnam-2018-0015.

Поступила в редакцию 06.08.2018 г.

Received by the editor 06.08.2018.