

# РАСЧЕТ НАВОДНЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ ПО ТРЕХМЕРНОЙ БАРОКЛИННОЙ МОДЕЛИ BALT-P

*С.К. Попов, А.Л. Лобов, В.В. Елисов*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации  
lmpi@yandex.ru*

## **Трехмерная гидродинамическая модель BALT-P для расчета уровня и течений в Балтийском море**

Трехмерная бароклинная модель BALT-P предназначена для расчета уровня моря и скоростей течений в морях и описывает широкий спектр движений, включая расчет приливов и штормовых нагонов [1–5]. Модель основана на системе уравнений геофизической гидродинамики со свободной поверхностью в приближениях гидростатики и  $f$ -плоскости [1]. Движение в море вызывается заданными на поверхности моря градиентами атмосферного давления и касательными напряжениями трения ветра. Внутри моря учитывается неравномерное распределение полей температуры и солености по пространству.

Исходная система уравнений геофизической гидродинамики выписана в традиционных приближениях гидростатики, Буссинеска. Пространственная аппроксимация выполняется с использованием метода интегрирования и интерполяции. По горизонтальным переменным используется сетка  $C$  по терминологии Аракавы. По времени используется явная схема со сдвигом, когда скорости течений определяются на четном, а уровень на нечетном шаге по времени, за исключением неявной аппроксимации процесса вертикального турбулентного обмена.

Программная реализация BALT-P представляет собой реализацию решения системы дифференциальных уравнений в частных

производных с помощью конечных разностей. Исходный текст написан на языке FORTRAN. Программа поддерживает распараллеливание в модели общей памяти с помощью технологии OpenMP [4]. Использование средств распараллеливания позволяет сделать вычислительно реальными численные решения гидродинамических задач на расчетных сетках высокого пространственного разрешения (например, для адекватного воспроизведения процессов в Невской губе).

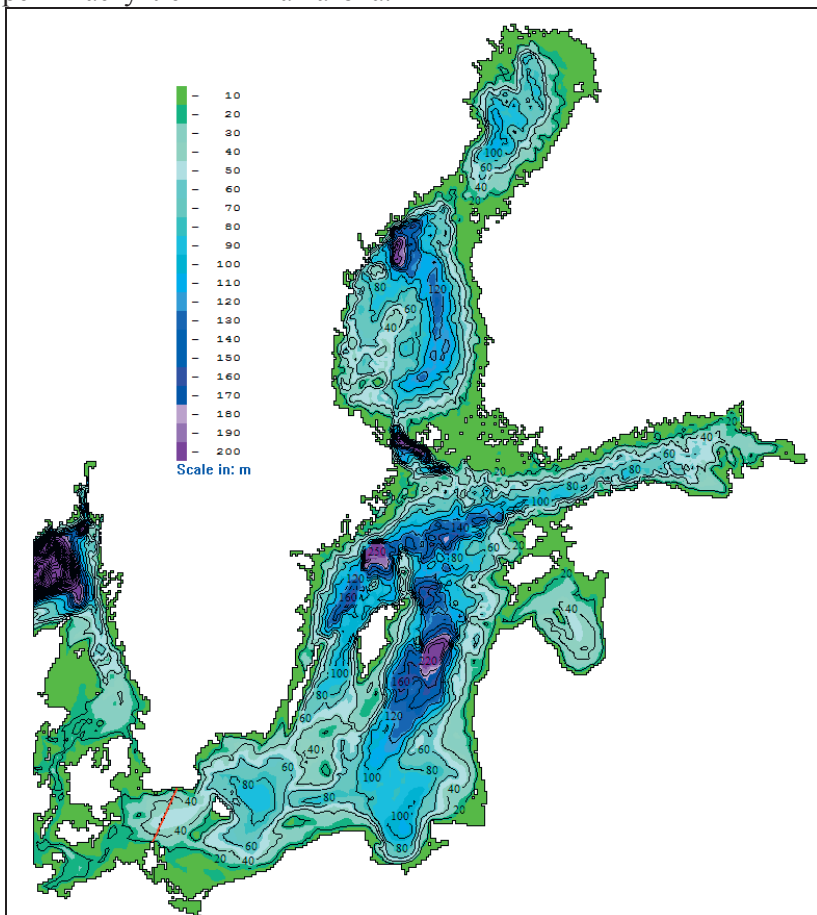
Входными данным для модели BALT-P являются поля давления и ветра по данным метеорологического прогноза (в том числеHIRLAM, COSMO). Выходными данными для модели BALT-P являются трехмерное поле скоростей течений и уровень Балтийского моря на численных сетках различного пространственного разрешения.

Расчет циркуляции Балтийского моря осуществляется на расчетной сетке с разрешением 2 морские мили по горизонтальным координатам (рис. 1).

Расчет циркуляции в верхней части Финского залива (ВЧФЗ), включая комплекс защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга, происходит на расчетной сетке с разрешением по пространству 90 м (рис. 2). При этом уровень моря, полученный в расчете на сетке всего Балтийского моря с разрешением 2 морские мили за период прогноза (60 часов) для точек крупной сетки, находящиеся на жидкой границе мелкой сетки, записывается в файл данных на каждом шаге по времени. Затем расчет повторяется для области детального пространственного разрешения (90 м по горизонтальным переменным). Данные об уровне моря 2-мильной сетки интерполируются на открытую жидкую границу мелкой сетки. Использование вложенной мелкой сетки необходимо для адекватного описания проникновения вод Балтийского моря сквозь водо- и судопропускные отверстия КЗС.

В модели BALT-P используется переменная по пространству толщина придонной ячейки. В отличие от многих глобальных моделей циркуляции, где рельеф дна задан с точностью до глубины расчетного горизонта, в данной модели толщина придонного слоя

изменяется по пространству и зависит от точного значения глубины места. Переменная толщина придонной ячейки позволяет правильно описывать рельеф дна, от которого, в свою очередь, зависит скорость движения нагонной волны. Скорость движения нагонной волны – крайне важная характеристика, поскольку она определяет время наступления пика нагона.



**Рис. 1. Расчетная 2-мильная сетка и батиметрия Балтийского моря модели BALT-P. Красная линия – жидкая граница сетки в районе Датских проливов.**

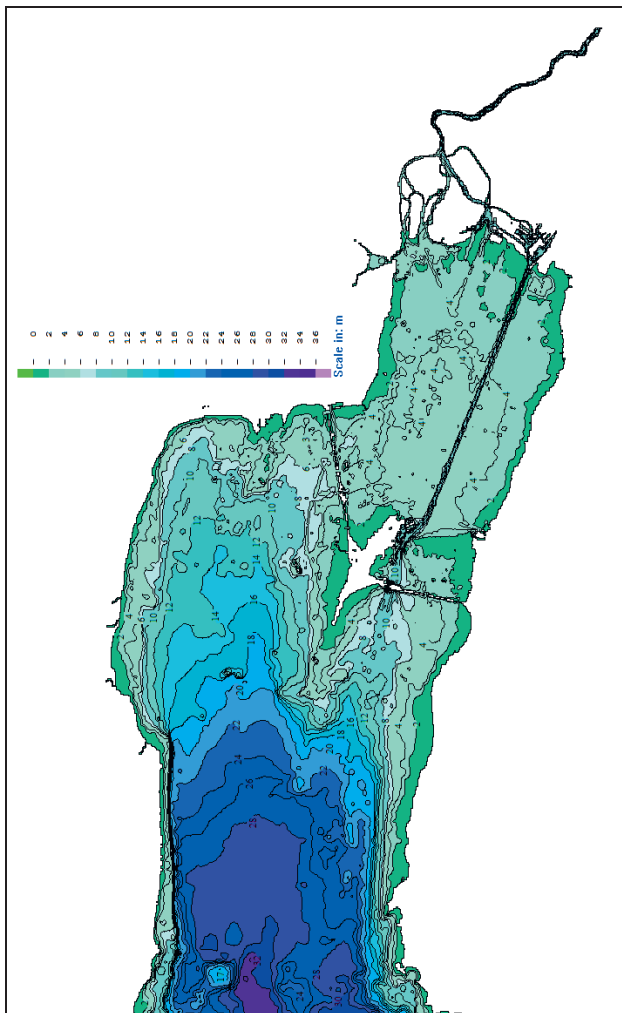


Рис. 2. Расчетная 90-метровая сетка и батиметрия ВЧФЗ с КЭС модели ВАЛТ-Р.

Кроме того, придонное трение зависит от величины придонной скорости течения, что является преимуществом трехмерной модели по сравнению с двухмерными моделями, где придонное трение зависит от средней по толщине воды скорости течения. Сочетание подробного описания рельефа дна с правильной аппроксимацией придонного трения в конечном итоге приводит к точному описанию скорости движения внешней гравитационной волны, а это, в свою очередь, дает хорошее совпадение по времени с наблюдаемыми пиками наступления наводнения.

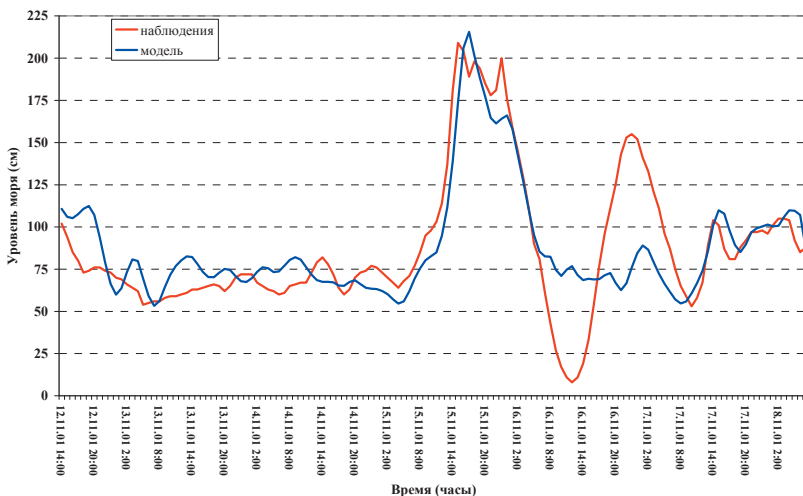
### **Моделирование 11 наводнений в Санкт-Петербурге**

Для каждой из расчетных ситуаций наводнений были подготовлены поля метеопрогноза по данным HIRLAM, а также данные ежечасных наблюдений за уровнем в пунктах Горный Институт, Кронштадт, Шепелево. За период ситуаций наводнения подготовлены ряды суточного стока реки Нева.

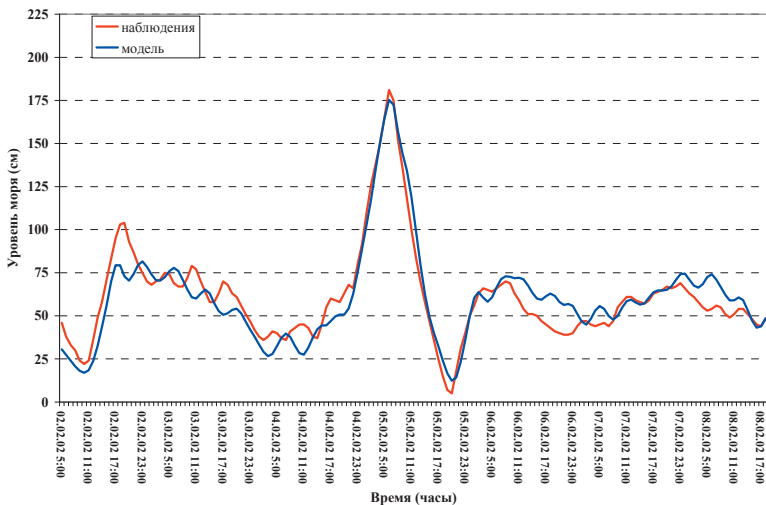
Для всех наводнений расчеты велись по схеме: «разгон» модели (трое суток до нагона), пик нагона и трое суток после нагона. Таким образом результаты расчета сравнивались с результатами наблюдений для периода 145 часов (72 часа до нагона, пик нагона и 72 часа после нагона). Непрерывные (без коррекции) расчеты уровня моря по заданному на поверхности моря атмосферному воздействию (ветер и давление) в течение 145 часов фактически являются прогнозом уровня моря на срок 6 суток. Причем непрерывный ряд «прогноза на 6 суток» атмосферного воздействия набран из прогнозов атмосферы по модели HIRLAM на сроки 0, 1, 2, 3, 4, 5 часов (прогнозы HIRLAM имеются с дискретностью 6 часов). Понятно, что такой (составленный из прогнозов на 6 часов) прогноз атмосферного воздействия на 6 суток по качеству лучше, чем просто непрерывный прогноз по атмосферной модели на 6 суток. Значительная часть ошибки прогноза уровня моря, связанная с ошибкой прогноза по атмосферной модели, уменьшается, остается собственно ошибка прогноза уровня моря, связанная с расчетом по морской трехмерной модели BALT-P. Прогнозы на 6 суток относятся к классу среднесрочных прогнозов от 3 до 15 суток [6].

Результаты сравнения расчетов уровня моря с наблюдениями представлены на рис. 3–10. Обозначения пунктов наблюдений: Г – Горный Институт, К – Кронштадт, Ш – Шепелево, С – точка на дамбе со стороны Финского залива. На этих рисунках сравниваются с наблюдениями для пункта Горный Институт расчеты по модели Балтийского моря на 2-мильной сетке.

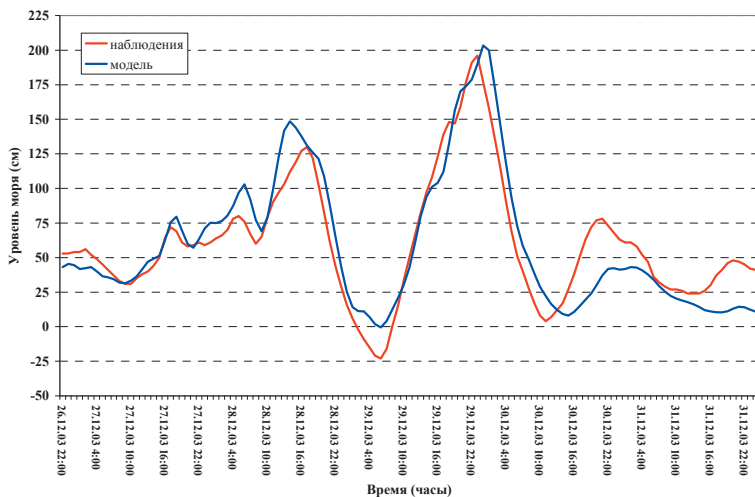
КЗС Санкт-Петербурга сдан в эксплуатацию 1 августа 2011 года. Поэтому расчеты по модели после этой даты проводились с учетом работающей дамбы. Для учета дамбы в модели было задано время открытия и закрытия водопропускных ворот. На рис. 11–13 приводится сравнение с наблюдениями расчетов по модели для пункта Горный Институт на 2-мильной и 90-метровой сетках с учетом закрытия и открытия ворот. Для сравнения на этих же рисунках приведен уровень моря, полученный на 2-мильной сетке без учета дамбы.



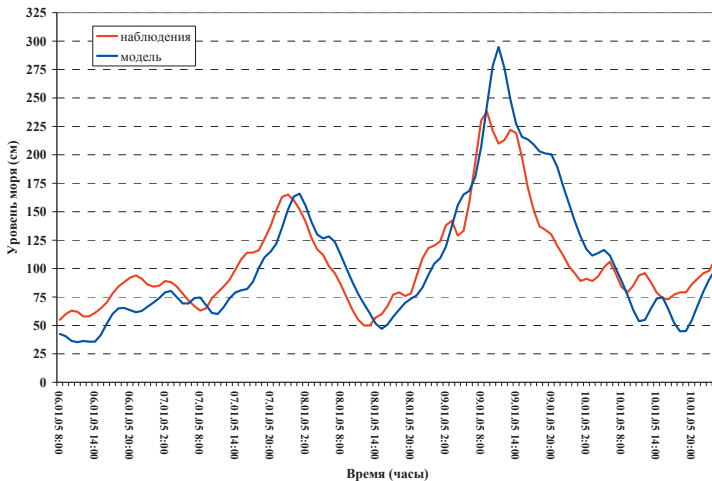
**Рис. 3. Уровень моря для пункта Горный Институт. Ситуация № 1, 12–18 ноября 2001 г.**



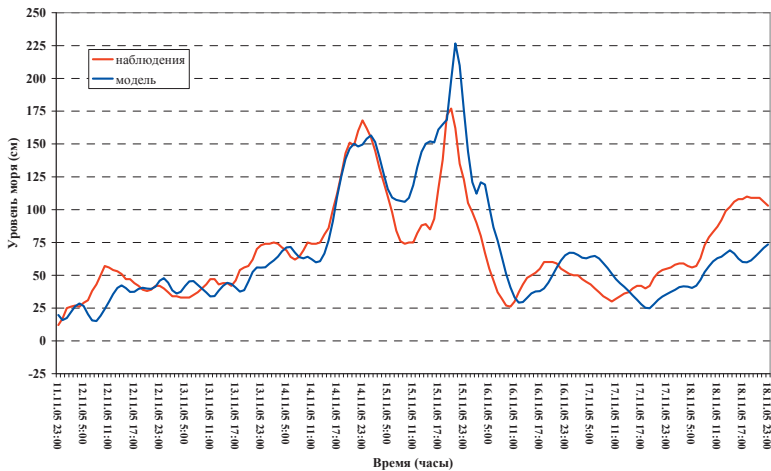
**Рис. 4. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация №2, 2–8 февраля 2002 г.**



**Рис. 5. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 3, 26 декабря 2003 г. – 1 января 2004 г.**

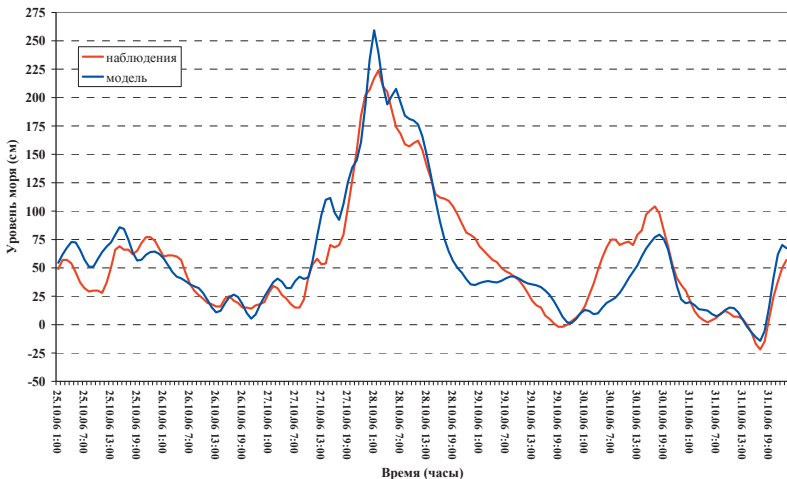


**Рис. 6. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 4, 6–11 января 2005 г.**

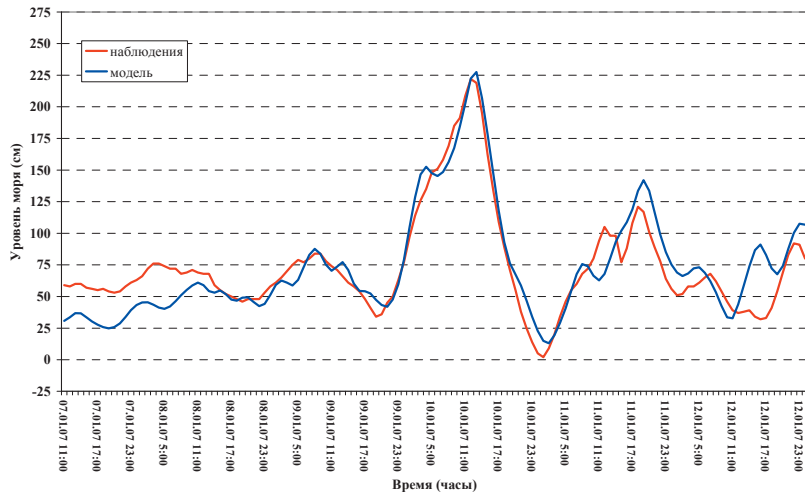


**Рис. 7. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 5, 11–18 ноября 2005 г.**

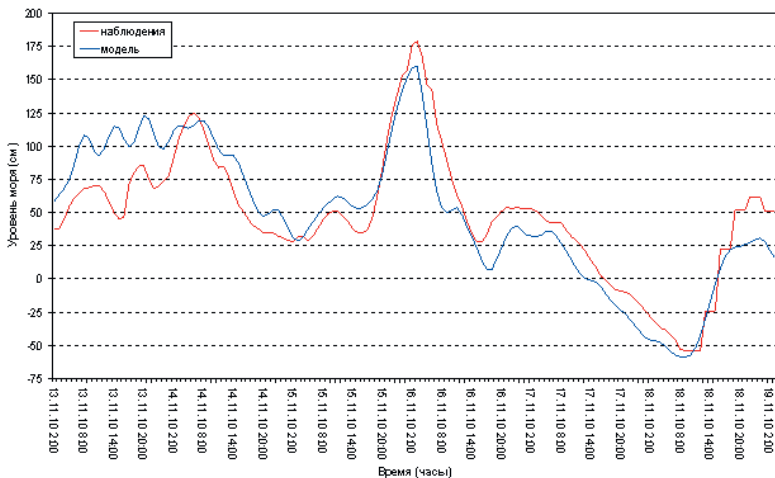




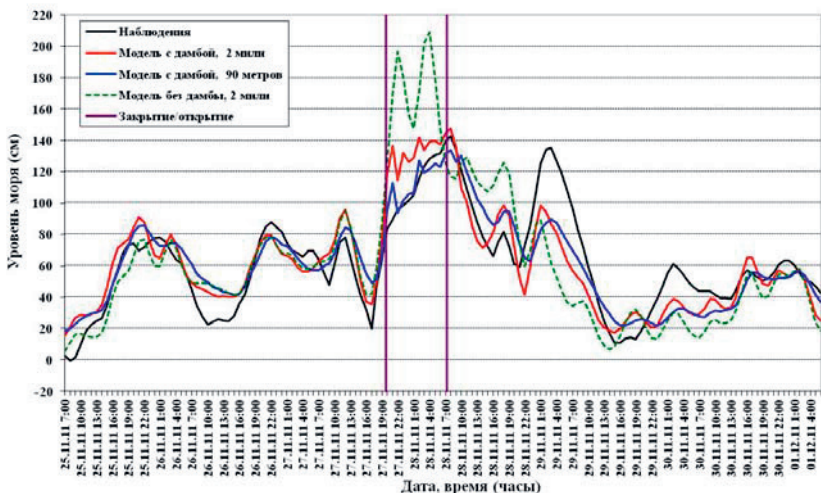
**Рис. 8. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 6, 25–31 октября 2006 г.**



**Рис. 9. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 7, 7–13 января 2007 г.**



**Рис. 10. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 8, 12–20 ноября 2010 г.**



**Рис. 11. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 9, 21 ноября – 2 декабря 2011 г.**

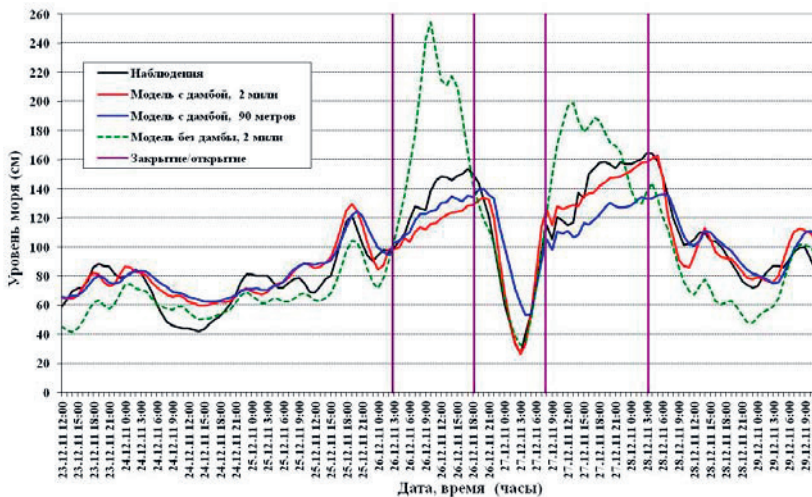


Рис. 12. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 10, 20 декабря – 1 января 2012 г.

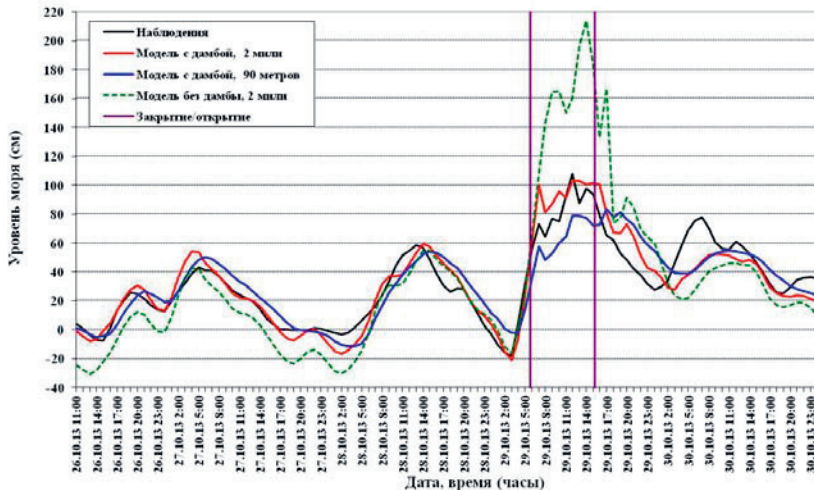


Рис. 13. Уровень моря для пункта Горный Институт.  
Ситуация № 11, 19–30 ноября 2013 г.

Для того, чтобы получить представление о количественных характеристиках точности прогнозов по модели BALT-P на 2-мильной сетке без учета дамбы, в табл. 1 приведены критерии точности прогнозов, принятые в Росгидромете [6].

К ним относятся:

–  $A_o$  – абсолютная ошибка расчетов, или MAE (Mean Average Error), см:

$$A_o = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{m_i} - x_{n_i}|. \quad (1)$$

Здесь  $x_{m_i}$  – данные расчета (прогноза);  $x_{n_i}$  – данные наблюдений;  $N$  – длина ряда.

–  $O_t$  – относительная ошибка расчетов, %:

$$O_t = \frac{A_o \cdot 100\%}{x_{n_{\max}} - x_{n_{\min}}}. \quad (2)$$

Здесь  $x_{n_{\max}}$  – максимум из данных наблюдений;  $x_{n_{\min}}$  – минимум из данных наблюдений.

–  $CKO_m$  – среднеквадратическая ошибка расчетов, см:

$$CKO_m = \delta_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{m_i} - x_{n_i})^2}{N-1}}. \quad (3)$$

–  $CKO_n$  – среднеквадратическая ошибка наблюдений, см:

$$CKO_n = \delta_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{n_i} - \bar{x})^2}{N-1}}. \quad (4)$$

–  $CKO\%$  – отношение (в %) среднеквадратической ошибки расчетов к среднеквадратической ошибке наблюдений:

$$CKO\% = 100 \frac{\delta_m}{\delta_n}. \quad (5)$$

–  $R_{cor}$  – коэффициент корреляции между данными наблюдений и моделирования:

$$R_{\text{cor}} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_n - \bar{x}_n)(x_m - \bar{x}_m)}{\left( \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_n - \bar{x}_n)^2 \right] \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_m - \bar{x}_m)^2 \right] \right)^{1/2}}. \quad (6)$$

Кроме того, в таблице приводятся обозначения:  $< 0,674\delta_n$ ,  $< 0,8\delta_n$ ,  $< 1,0\delta_n$  – процент расчетов, не выходящих за соответствующие пределы, т. е. оправдываемость расчета (прогноза) в процентах [6]. Согласно требованиям [6], для краткосрочных и среднесрочных прогнозов в качестве предельного значения допустимой ошибки принимается величина, не превышающая  $\pm 0,674\sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение данных наблюдений. Процент расчетов, не превышающий значение этой ошибки, выделен в табл. 1 «жирным» шрифтом.

Из указанного столбца табл. 1 видно, что средняя оправдываемость прогнозов по модели BALT-P при допустимой ошибке  $< 0,674\delta_n$  равна 79,1 % (при разбросе от 66,3 до 94,3 % по разным ячейкам данного столбца). Теоретическая (допустимая) оправдываемость по [6] в данном случае устанавливается 50 % (что соответствует коэффициенту 0,674 как 25%-квантили нормального распределения). Как следствие, фактическая оправдываемость по табл. 1 на 29,1 % выше минимально допустимой, что позволяет сделать вывод о том, что модель имеет «запас точности». Оправдываемость 79,1 % означает, что с точки зрения требований Росгидромета модель получает оценку удовлетворительно.

Средняя величина коэффициента корреляции  $R_{\text{cor}}$  равна 0,874 при разбросе 0,735–0,941, что свидетельствует о достаточно высокой линейной связи между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями уровня моря.

Для оценки работы модели в условиях работающей дамбы в табл. 2 и 3 представлены результаты расчетов трех ситуаций наводнений на 2-мильной и 90-метровой сетках. Средняя оправдываемость расчетов (прогнозов) при допустимой ошибке  $< 0,674\delta_n$ , равна:

- для 2-миллионной сетки 87,4 % (при разбросе от 70,1 до 95,8 %);
- для 90-метровой сетки 86,5 % (при разбросе от 80,9 до 95,8 %).

Таблица 1

**Оценка точности расчетов нагонов по модели ВАЛТ-Р  
по критериям [6]**

№	Пункт	Оценка точности расчетов							R <sub>кор</sub>
		A <sub>о</sub> , см	O <sub>1</sub> , %	СКО, см	СКО, %	< 0,674δ <sub>n</sub>	< 0,8δ <sub>n</sub>	< 1,0δ <sub>n</sub>	
1	Г	17,4	8,7	25,1	61,3	<b>81,0</b>	83,2	89,1	0,790
	К	19,7	9,4	27,6	70,0	<b>78,8</b>	82,5	87,6	0,777
	Ш	24,5	11,6	32,0	80,8	<b>73,0</b>	78,8	83,2	0,735
2	Г	8,0	4,5	10,0	35,7	<b>94,3</b>	98,7	99,4	0,937
	К	8,2	4,9	10,4	38,3	<b>88,6</b>	94,9	100,0	0,941
	Ш	12,8	7,7	16,1	61,9	<b>72,8</b>	79,1	88,6	0,894
3	Г	15,6	7,1	19,5	44,6	<b>85,4</b>	92,7	98,4	0,918
	К	16,6	8,2	19,8	48,2	<b>80,5</b>	93,5	99,2	0,914
	Ш	21,0	11,1	27,2	69,6	<b>68,3</b>	74,0	84,6	0,851
4	Г	22,7	12,1	28,0	65,5	<b>80,5</b>	86,7	90,3	0,896
	К	19,0	10,6	24,9	58,4	<b>81,4</b>	85,8	90,3	0,913
	Ш	21,9	12,2	31,2	75,8	<b>74,3</b>	77,0	79,6	0,851
5	Г	18,2	11,0	23,9	67,0	<b>75,7</b>	80,5	86,4	0,836
	К	17,9	12,5	25,3	79,9	<b>74,0</b>	76,3	80,5	0,863
	Ш	19,9	15,0	27,9	95,1	<b>66,3</b>	74,0	76,3	0,841
6	Г	16,2	6,6	21,1	40,7	<b>88,0</b>	92,2	98,8	0,922
	К	21,6	11,2	25,7	60,6	<b>70,1</b>	78,4	92,2	0,898
7	Г	14,2	6,5	18,2	44,8	<b>88,1</b>	94,0	97,8	0,908
	К	17,1	9,3	20,2	57,9	<b>74,6</b>	83,6	95,5	0,903
8	Г	19,1	8,2	23,1	48,7	<b>85,6</b>	91,8	95,2	0,899
<b>Среднее</b>		<b>17,6</b>	<b>9,4</b>	<b>22,9</b>	<b>60,2</b>	<b>79,1</b>	<b>84,9</b>	<b>90,7</b>	<b>0,874</b>

Таблица 2

**Оценка точности расчетов нагонов по модели BALT-P  
2-мильная сетка**

№	Пункт	Оценка точности расчетов							R <sub>кор</sub>
		A <sub>о</sub> , см	O <sub>т</sub> , %	СКО, см	СКО, %	< 0,674δ <sub>н</sub>	< 0,8δ <sub>н</sub>	< 1,0δ <sub>н</sub>	
9	Г	13,4	9,4	16,9	52,2	<b>86,1</b>	91,0	93,7	0,862
	С1	13,7	8,9	17,0	53,8	<b>84,7</b>	91,7	94,4	0,852
	Ш	12,2	7,9	15,5	50,6	<b>82,6</b>	91,7	94,4	0,865
10	Г	16,8	12,2	20,2	59,2	<b>70,1</b>	79,9	93,1	0,941
	С1	9,7	5,3	12,8	30,8	<b>95,8</b>	98,6	99,3	0,963
	Ш	11,9	7	15,4	40,8	<b>90,3</b>	95,8	98,6	0,968
11	Г	8,2	6,6	11,1	40,1	<b>90,9</b>	93,6	97,3	0,931
	С1	10,3	5,0	14,7	40,0	<b>92,7</b>	95,5	97,3	0,924
	Ш	9,1	5,4	12,0	36,7	<b>93,6</b>	95,5	98,2	0,939
<b>Среднее</b>		<b>11,7</b>	<b>7,5</b>	<b>15,1</b>	<b>44,9</b>	<b>87,4</b>	<b>92,6</b>	<b>96,3</b>	<b>0,916</b>

Таблица 3

**Оценка точности расчетов нагонов по модели BALT-P  
2-мильная сетка**

№	Пункт	Оценка точности расчетов							R <sub>кор</sub>
		A <sub>о</sub> , см	O <sub>т</sub> , %	СКО, см	СКО, %	< 0,674δ <sub>н</sub>	< 0,8δ <sub>н</sub>	< 1,0δ <sub>н</sub>	
9	Г	12,2	8,5	15,5	48,0	<b>84,0</b>	91,0	95,1	0,877
	С1	13,4	8,7	16,7	52,8	<b>84,7</b>	91,7	94,4	0,858
10	Г	12,4	9,0	16,0	46,8	<b>81,9</b>	88,9	95,8	0,908
	С1	10,5	5,8	13,6	32,7	<b>95,8</b>	97,9	99,3	0,961
11	Г	11,3	9,0	14,0	50,8	<b>80,9</b>	89,1	92,7	0,863
	С1	10,5	5,1	14,7	40,2	<b>91,8</b>	94,5	96,4	0,924
<b>Среднее</b>		<b>11,7</b>	<b>7,7</b>	<b>15,1</b>	<b>45,2</b>	<b>86,5</b>	<b>92,2</b>	<b>95,6</b>	<b>0,899</b>

Теоретическая обеспеченность климатического прогноза (прогноз по климатической норме) при принятых допустимых ошибках 0,674σ, 0,8σ и σ составляет, соответственно, 50, 58 и 68 %, следовательно, предложенный метод прогноза по модели BALT-P имеет

эффективность 20,1–45,8 % (в среднем 37,4 %). По критериям успешности прогнозов [6] это означает, что расчет по модели BALT-P с учетом работающей дамбы получает оценку хорошо.

Уверенность в адекватности модели подкрепляется большими значениями коэффициента корреляции  $R_{\text{cor}}$ , средняя величина которого равна для 2-мильной сетки 0,916 (при разбросе 0,852–0,968), для 90-метровой сетки 0,899 (при разбросе 0,858–0,961), что свидетельствует о высокой линейной связи между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями уровня моря.

В результате расчетов установлено, что модель корректно воспроизводит временной ход уровня моря во всех представленных 11 наводнениях. Проведенные численные эксперименты показали, что представленная модель может быть использована при среднесрочном прогнозировании уровня моря в Финском заливе.

#### Список использованных источников

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. *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.
3. *Попов С.К.* Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 5. – С. 76–84.
4. *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.
5. *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.
6. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада лтд, 2011. – 200 с.

*Поступила в редакцию 14.04.2015 г.*