

МЕТОД КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА УРОВНЯ БАРЕНЦЕВА И БЕЛОГО МОРЕЙ

В лаборатории морских прикладных исследований ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана технология краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Баренцевом и Белом морях. В её основу положена трехмерная гидродинамическая модель со свободной поверхностью. Расчетная область охватывает Баренцево и Белое море с шагом 5 морских миль (9260 м) на сетке 156×201 узлов и имеет 20 расчетных горизонтов по вертикали. Условие свободной поверхности позволяет описывать распространение длинных гравитационных волн в горизонтальной плоскости. Модель численно реализована на сетке “С” по пространству, используется явная схема по времени, за исключением вертикального турбулентного обмена, который аппроксимируется по неявной схеме. Шаг по времени равен 90 с, что связано с ограничением Куранта при явном описании процесса распространения поверхностных гравитационных волн. Описание модели приведено в [4].

Входные данные

В качестве исходной информации для расчета граничных условий на поверхности моря (касательного напряжения ветра) использованы поля приземного давления с дискретностью 6 часов, полученные из региональной атмосферной модели ФГБУ «Гидрометцентр России» [2]. Сопоставление полей давления с реальными штормами [1] показало их хорошее согласие.

Технология расчета прогнозов

Оперативная технология расчета полей ветра, уровня моря и скоростей течений реализована и функционирует в ФГБУ «Гидрометцентр России» с 2009 года. Прогнозы рассчитываются в два этапа, последовательно используя атмосферную модель и гидродинамическую модель Баренцева и Белого морей.

На первом этапе выполняется прогноз атмосферного давления на основе региональной

30-уровневой модели атмосферы с шагом по пространству 75 км. Модель обеспечивает прогноз приземного давления с заблаговременностью 48 часов. Прогноз обновляется через 12 часов.

На втором этапе рассчитанные по полям атмосферного давления поля ветра служат исходной информацией для расчета граничных условий на поверхности моря. Прогнозы уровня и течений выполняются с заблаговременностью 48 часов, с обновлением результатов каждые 12 часов. Результаты прогнозов записываются в базу данных (с дискретностью 1 час) и сохраняются в течение 5 суток с постоянным обновлением.

После того, как расчет по атмосферной модели окончен, начинается расчет по морской модели. Морская модель стартует с предыдущего срока, который на 12 часов отстает от срока текущего поступившего прогноза давления по атмосферной модели. Поля давления за предшествующие 12 часов, необходимые для модели моря, берутся из предыдущего прогноза по атмосферной модели (в предыдущем прогнозе это поля с заблаговременностью 0 и 6 часов), а остальные девять полей давления – из текущего прогноза по атмосферной модели. По морской модели расчеты прогнозов ведутся на 60 часов (с -12 до 48), но в базу данных записываются только 49 полей, первое поле соответствует заблаговременности 0 часов, а последнее – заблаговременности 48 часов текущего атмосферного прогноза.

Диагностические и прогностические расчеты

В соответствии с [5], испытания метода прогноза проводятся в два этапа:

1. Диагностические расчеты по полям давления (касательного напряжения ветра).
2. Расчеты по прогностическим полям давления (касательного напряжения ветра).

Для верификации диагностических расчетов использованы данные наблюдений за уровнем моря, представленные в [3]. Эта работа выполнена ФГБУ «Гидрометцентр России» по договору с ООО «Питер Газ» в 2009 году. Наблюдения проведены в юго-западной части Баренцева моря в летне-осенний период 2006 г. (рис. 1) измерителями уровня моря RCM-9 (производство «AADI», Норвегия). Наблюдения проводились с дискретностью 10 минут и осреднением 10 минут, для корректного сопоставления данные модели также осреднены за каждые 10 минут.

Оценка точности как диагностических, так и прогностических расчетов выполнена по критериям, изложенным в [5, глава 7]. Отметим, что в настоящее время отсутствует методика оценки точности расчета уровня в приливных морях, поэтому дополнительным критерием был процент случаев, когда ошибки расчетов не превышают 10, 20 и 30 см.

Для летне-осеннего периода 2006 г. для каждой из 6 точек выполнены опытные прогнозы уровня моря. Для каждой точки составлено от 33 до 125 прогнозов – количество прогнозов зависит от продолжительности серий наблюдений за уровнем моря, которые использованы для оценки точности прогнозов. Результаты диагностических и прогностических расчетов представлены на рис. 2–7 и в табл. 1–7.

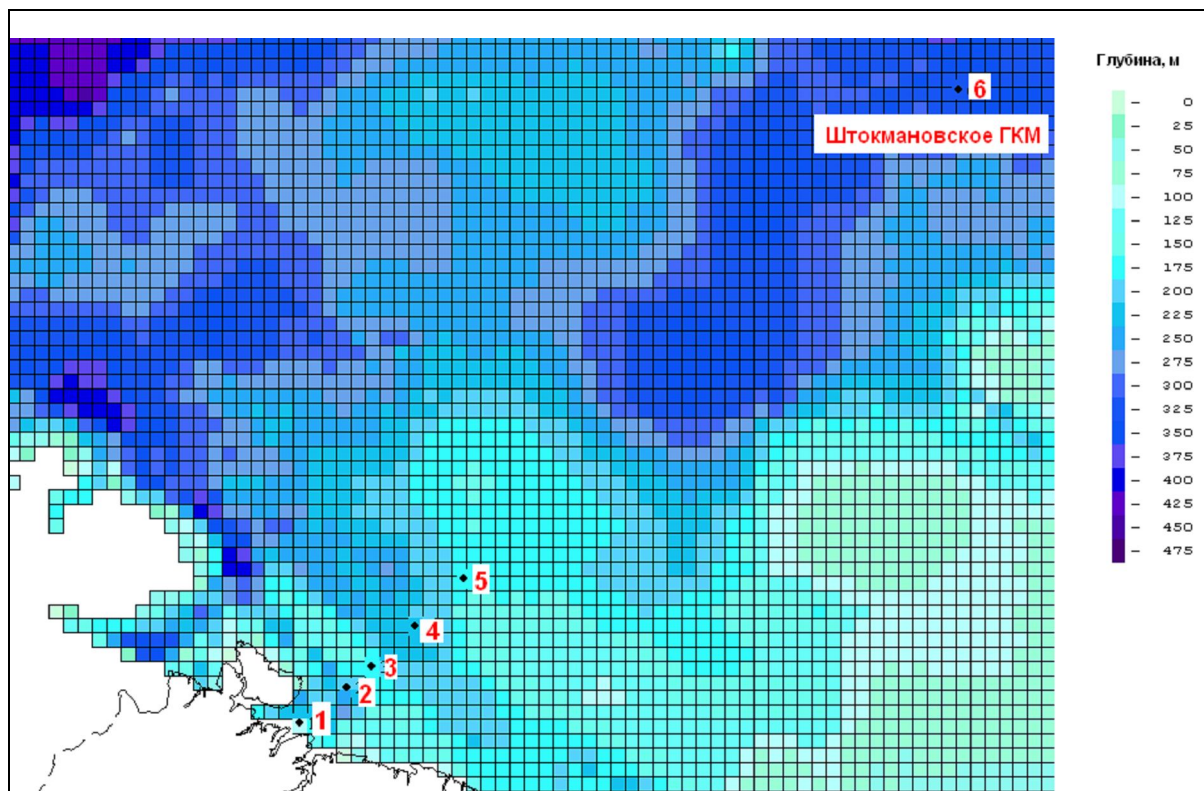


Рис. 1. Расположение точек наблюдений в юго-западной (точки 1–5) и центральной частях Баренцева моря (точка 6).

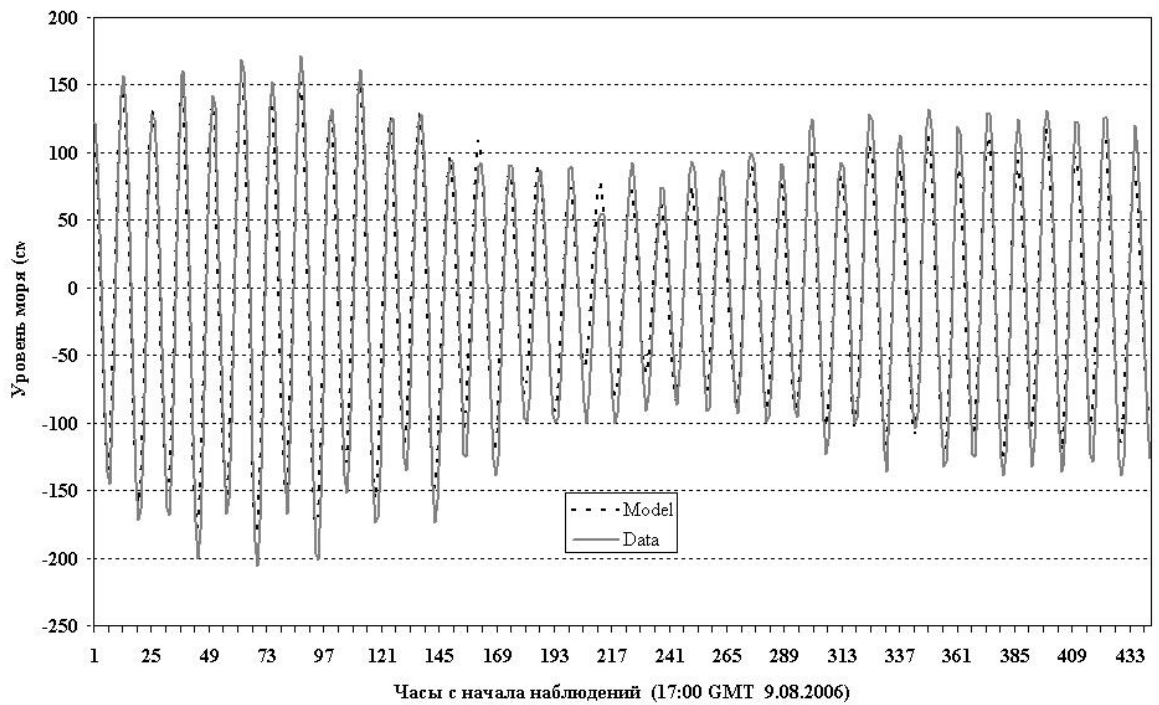


Рис. 2. Результаты диагностических расчетов уровня моря в точке 1.

Показаны только первые 18 суток наблюдений и расчета.

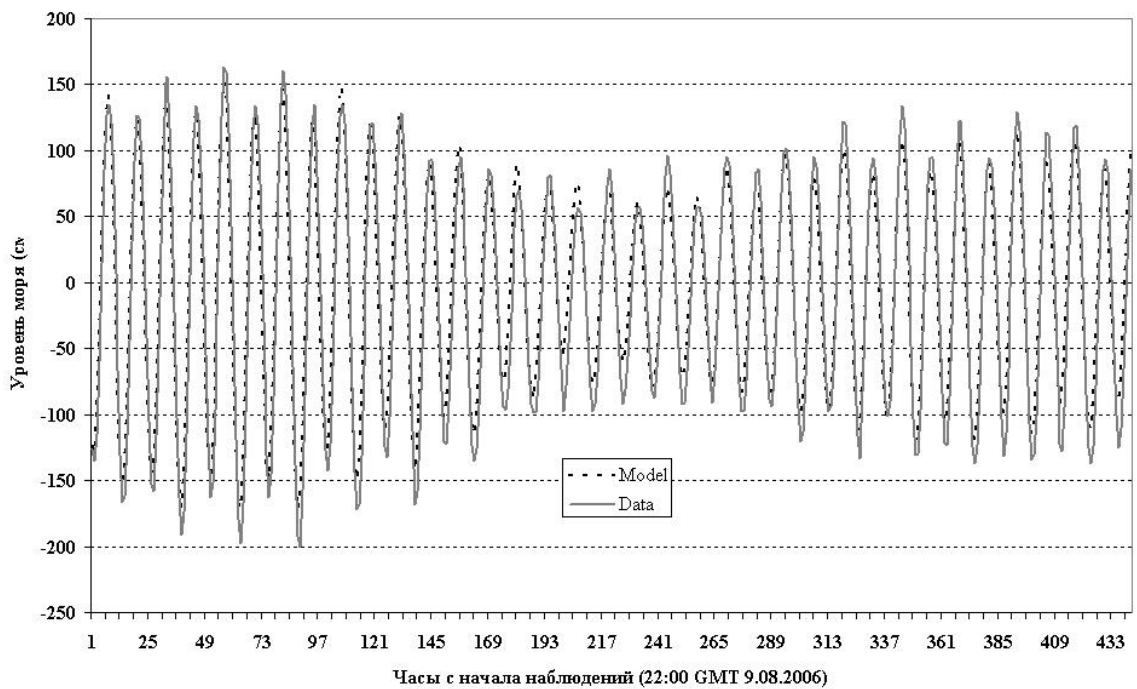


Рис. 3. Результаты диагностических расчетов уровня моря в точке 2.

Показаны только первые 18 суток наблюдений и расчета.

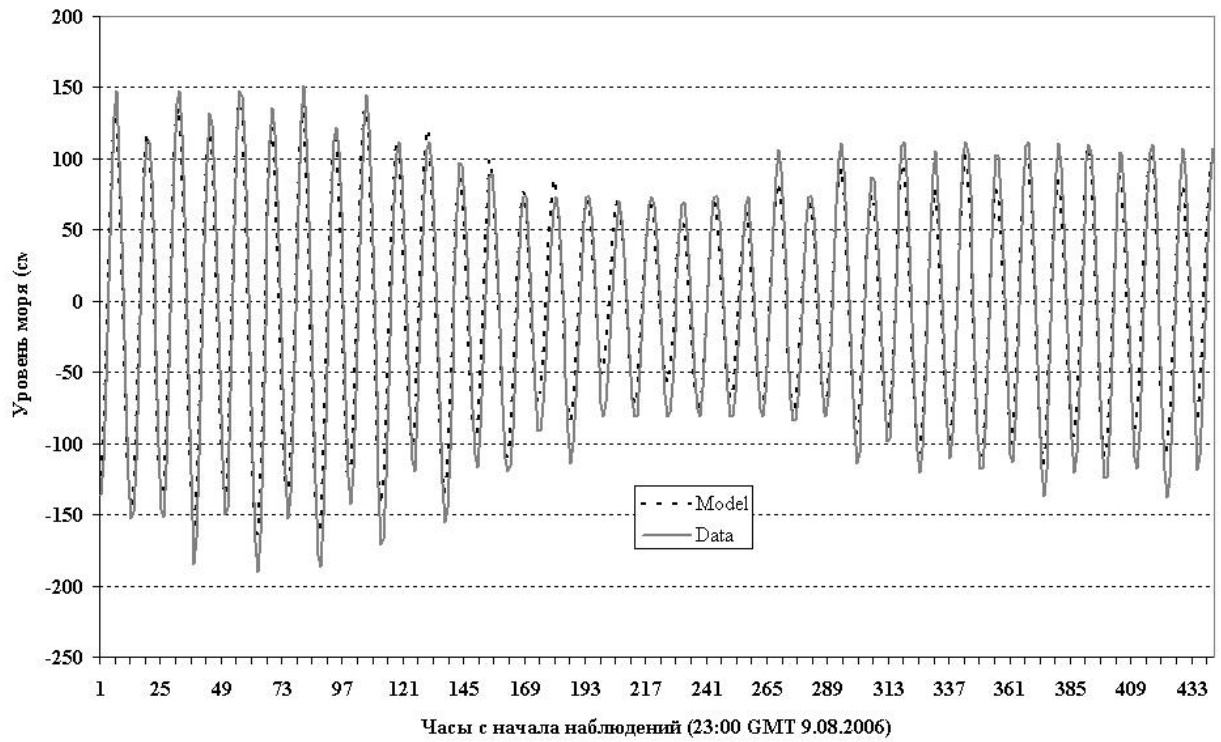


Рис. 4 Результаты диагностических расчетов уровня моря в точке 3.
Показаны только первые 18 суток наблюдений и расчета.

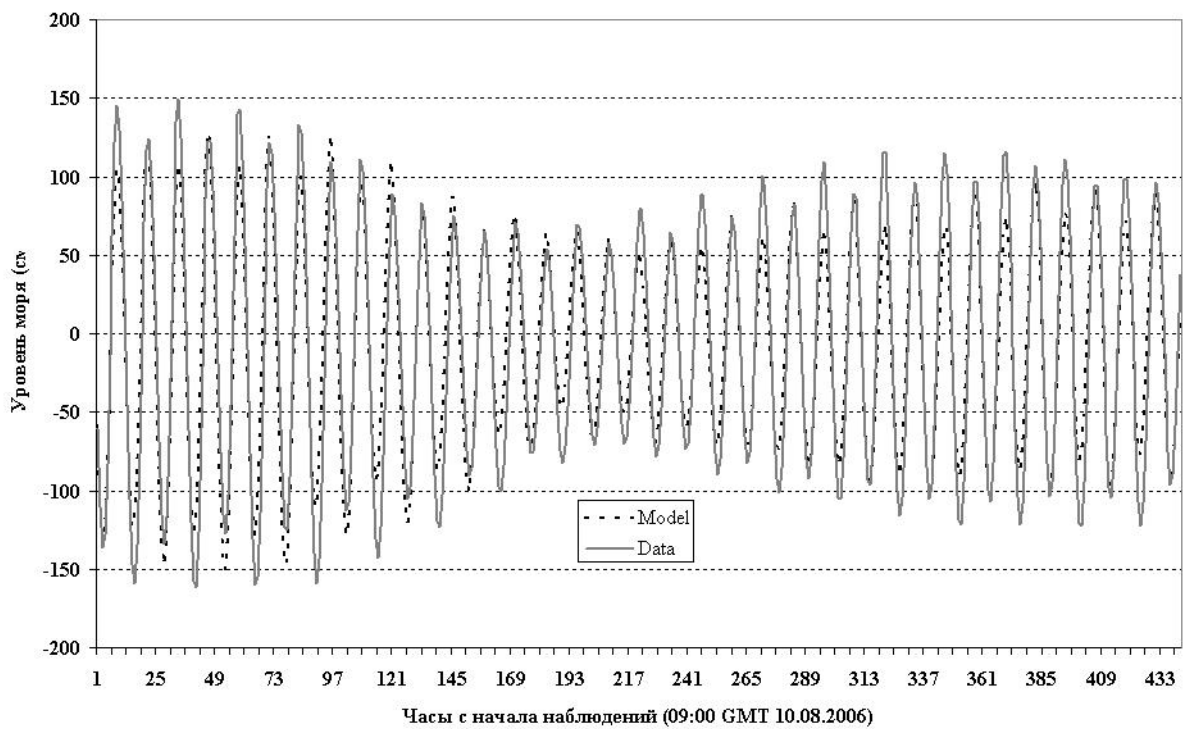
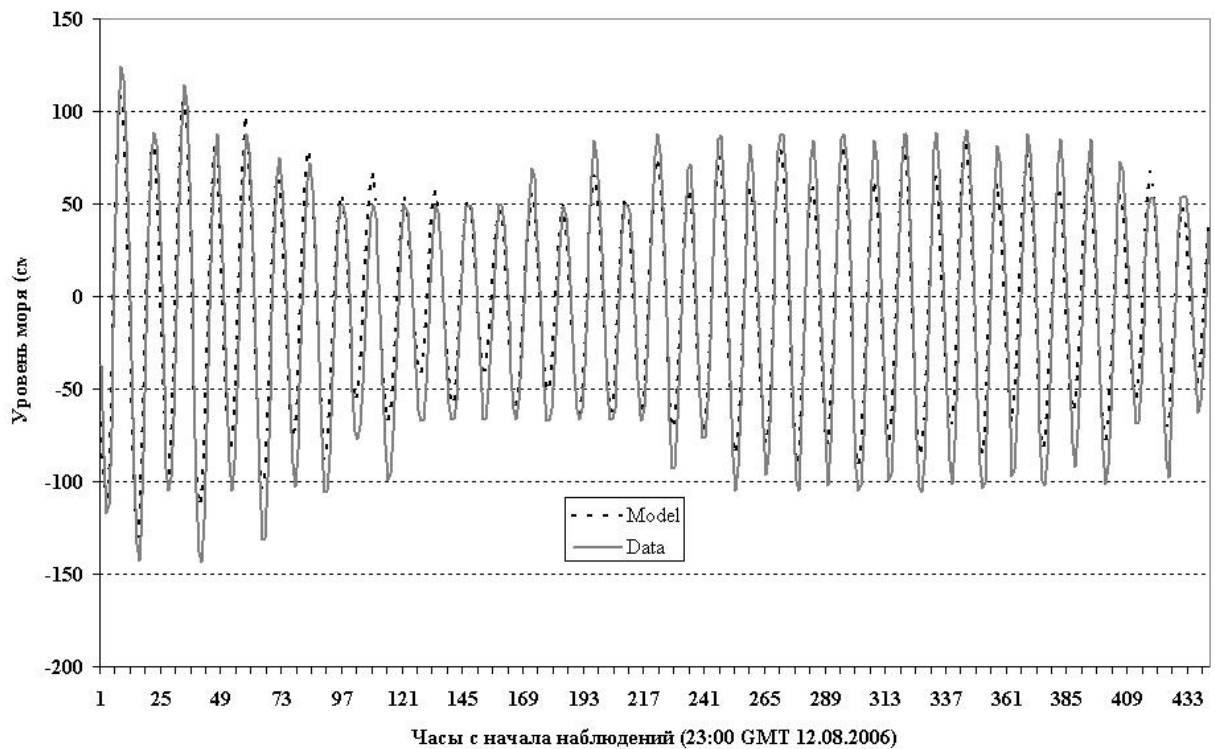
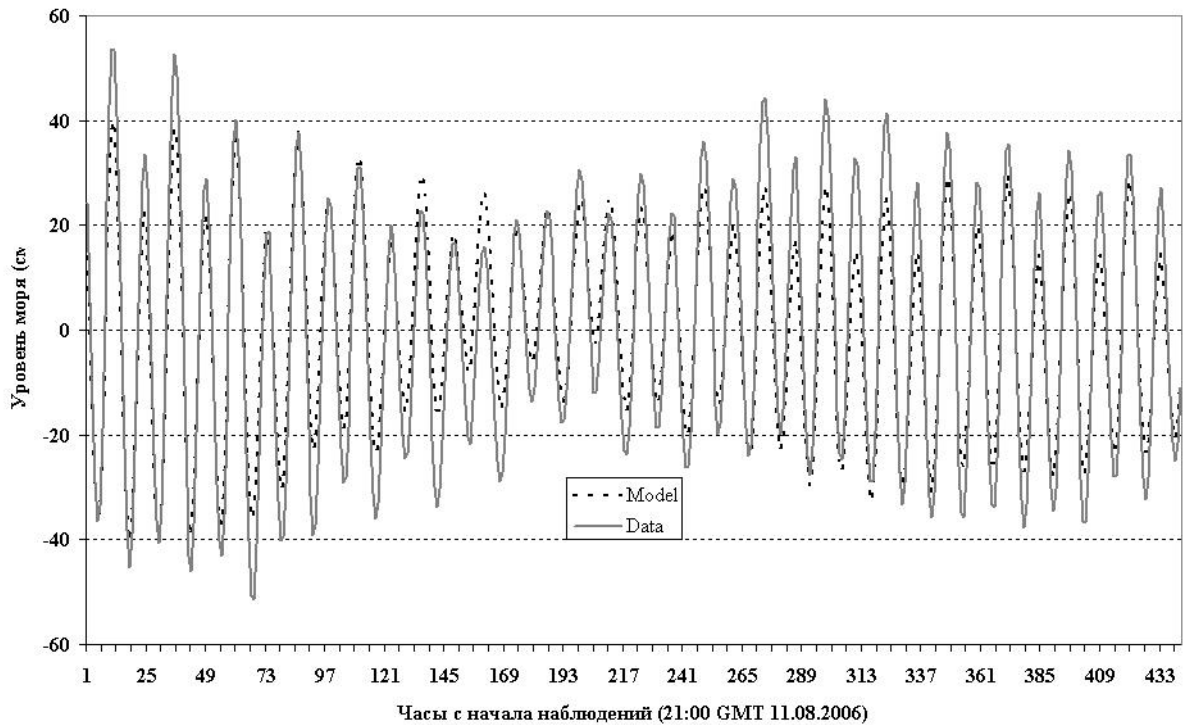


Рис. 5. Результаты диагностических расчетов уровня моря в точке 4.
Показаны только первые 18 суток наблюдений и расчета.



**Рис. 6. Результаты диагностических расчетов уровня моря в точке 5.
Показаны только первые 18 суток наблюдений и расчета.**



**Рис. 7. Результаты диагностических расчетов уровня моря в точке 6.
Показаны только первые 18 суток наблюдений и расчета.**

Оценка точности диагностических и прогностических расчетов уровня моря

Расчет	Max(см)	Min(см)	СКО	Max(см)	Min(см)	СКО(см)	Оценка точности расчетов						Rкор	
	Данные наблюдений			Результаты расчетов			Ao	Ot%	СКО ошиб.	СКО, %	<10 см	<20 см		< 30 см
Точка № 1														
Диагноз	208,5	-225,4	89,1	183,3	-179,1	79,6	15,0	3,6	18,3	20,6	40,5	69,6	89,1	0,983
Прогноз				176,1	-188,7	76,2	16,3	6,1	19,7	23,1	36,3	66,2	86,1	0,981
Точка № 2														
Диагноз	183,2	222,9	85,5	177,4	-171,1	76,9	14,4	3,5	18,0	21,0	42,2	71,9	90,1	0,981
Прогноз				173,0	-180,9	74,1	15,6	6,0	19,0	23,0	38,2	68,4	87,7	0,980
Точка № 3														
Диагноз	193,2	-204,4	81,5	169,9	-163,9	73,2	13,9	3,5	17,3	21,2	42,9	73,7	91,7	0,981
Прогноз				165,4	-172,3	70,6	15,3	6,2	18,6	23,7	38,7	69,1	88,6	0,978
Точка № 4														
Диагноз	166,7	-183,5	73,1	153,2	-150,1	63,9	16,7	4,8	21,1	28,9	38,2	66,1	83,3	0,961
Прогноз				146,2	-150,7	61,8	16,9	7,3	21,1	29,0	39,3	66,7	82,1	0,966
Точка № 5														
Диагноз	146,3	-184,8	64,5	134,6	-132,1	56,4	12,1	3,6	15,1	23,5	48,4	80,0	95,5	0,978
Прогноз				132,6	-134,5	53,8	14,1	7,2	17,3	27,8	42,4	73,3	91,4	0,970
Точка № 6														
Диагноз	60,5	-51,1	23,2	39,7	-40,8	18,4	6,6	5,9	8,1	34,9	78,0	100,0	100,0	0,950
Прогноз				44,1	-39,6	17,6	6,6	8,6	7,7	34,3	78,2	99,8	100,0	0,959

Обозначения в таблице:

Max, Min – соответственно, максимальное, минимальное значения уровня,

СКО – среднеквадратическое отклонение уровня по данным наблюдений (см); Max, Min СКО по данным расчетов

Ao – абсолютная ошибка расчетов (см);

Ot% – относительная ошибка расчетов = Ao/(Max-Min) данных наблюдений;

СКО ошиб. – среднеквадратическая ошибка расчетов (см);

СКО% – отношение (в %) среднеквадратической ошибки расчетов к СКО наблюдений;

<10см, <20 см, <30 см – средняя по всем заблаговременностям оправдываемость (процент оправдавшихся прогнозов от общего числа прогнозов) при ошибках расчетов, не выходящих за пределы 10 см, 20 см и 30 см соответственно;

Rкор – коэффициент корреляции между данными наблюдений и моделирования.

Таблица 2

**Результаты оценки прогностических расчетов уровня моря с заблаговременностью
0–48 часов для точки 1. 119 прогнозов**

Заблаговременность, ч	Набл.	Прогноз	Оценка точности расчетов				Число прогнозов с ошибкой менее:			Rкор
	СКО, см	СКО, см	Ao	Ot%	СКО ошиб.	СКО %	< 10 см	< 20 см	< 30 см	
0	99,1	85,0	16,9	5,2	21,5	21,7	46	73	99	0,984
6	91,7	82,3	13,3	4,5	17,1	18,6	57	94	104	0,987
12	100,2	85,8	16,9	5,1	21,4	21,3	47	76	100	0,985
18	92,2	82,5	13,0	4,5	16,6	18,1	58	92	107	0,988
24	100,1	86,0	16,7	5,1	21,1	21,1	43	74	100	0,986
30	92,8	82,8	13,0	4,5	16,7	18,0	60	94	107	0,988
36	100,6	86,9	16,8	5,1	21,0	20,9	45	76	101	0,986
42	92,9	82,6	13,4	4,6	17,4	18,7	62	90	106	0,987
48	99,8	78,6	21,2	6,5	26,4	26,4	46	73	99	0,984

Обозначения аналогичны табл. 1.

Таблица 3

**Результаты оценки прогностических расчетов уровня моря с заблаговременностью
0–48 часов для точки 2. 125 прогнозов**

Заблаговременность, ч	Набл.	Прогноз	Оценка точности расчетов				Число прогнозов с ошибкой менее:			Rкор
	СКО, см	СКО, см	Ao	Ot%	СКО ошиб.	СКО %	< 10 см	< 20 см	< 30 см	
0	100,9	85,5	16,8	5,1	21,8	21,6	53	80	102	0,986
6	92,5	83,1	13,2	4,9	16,7	18,0	56	94	114	0,988
12	100,4	85,7	16,1	4,9	20,7	20,6	54	83	104	0,988
18	92,2	82,3	12,9	4,9	16,2	17,6	62	92	116	0,989
24	99,2	85,4	15,9	4,8	20,3	20,4	53	84	106	0,987
30	91,7	81,4	13,1	5,0	16,4	17,9	60	95	117	0,989
36	98,4	85,1	15,9	4,8	19,9	20,2	49	82	108	0,987
42	90,8	80,2	13,8	5,3	17,1	18,9	53	92	113	0,987
48	96,3	76,1	20,3	6,2	25,0	26,0	36	72	95	0,985

Обозначения аналогичны табл. 1.

Таблица 4

**Результаты оценки прогностических расчетов уровня моря с заблаговременностью
0–48 часов для точки 3. 125 прогнозов**

Заблаговременность, ч	Набл.	Прогноз	Оценка точности расчетов				Число прогнозов с ошибкой менее:			Rкор
	СКО, см	СКО, см	Ao	Ot%	СКО ошиб.	СКО %	< 10 см	< 20 см	< 30 см	
0	96,4	81,4	19,0	6,5	22,5	23,3	36	69	103	0,982
6	86,5	79,2	14,0	5,2	17,4	20,1	51	93	115	0,982
12	96,1	81,6	18,3	6,2	21,6	22,5	31	72	105	0,983
18	86,4	78,4	14,0	5,3	17,3	20,0	55	89	116	0,983
24	95,0	81,3	17,9	6,1	21,3	22,4	34	75	105	0,983
30	86,1	77,5	14,3	5,3	17,8	20,7	51	92	114	0,982
36	93,9	81,0	17,2	5,9	20,7	22,1	39	78	104	0,983
42	85,3	76,4	14,8	5,4	18,6	21,8	51	92	110	0,980
48	92,0	72,3	21,1	7,2	25,3	27,5	29	67	93	0,981

Обозначения аналогичны табл. 1.

Таблица 5

**Результаты оценки прогностических расчетов уровня моря с заблаговременностью
0–48 часов для точки 4. 97 прогнозов**

Заблаговременность, ч	Набл.	Прогноз	Оценка точности расчетов				Число прогнозов с ошибкой менее:			Rкор
	СКО, см	СКО, см	Ao	Ot%	СКО ошиб.	СКО %	< 10 см	< 20 см	< 30 см	
0	85,4	72,0	18,6	7,2	23,4	27,4	34	58	78	0,970
6	80,4	69,8	15,3	6,4	20,0	24,9	41	70	82	0,974
12	84,9	71,2	18,2	7,0	23,0	27,1	34	59	80	0,972
18	79,3	68,9	15,0	6,4	19,6	24,7	41	72	83	0,975
24	83,4	70,8	17,8	6,8	22,5	27,0	34	60	80	0,971
30	78,3	67,4	15,2	6,6	19,5	24,9	42	71	83	0,975
36	82,4	69,8	17,9	6,8	22,4	27,2	31	60	80	0,970
42	76,8	66,4	15,5	6,8	19,4	25,3	38	69	85	0,973
48	80,6	62,2	20,2	7,7	25,7	31,8	30	56	79	0,968

Обозначения аналогичны табл. 1.

Таблица 6

**Результаты оценки прогностических расчетов уровня моря с заблаговременностью
0–48 часов для точки 5. 115 прогнозов**

Заблаговременность, ч	Набл.	Прогноз	Оценка точности расчетов				Число прогнозов с ошибкой менее:			Rкор
	СКО, см	СКО, см	Ao	Ot%	СКО ошиб.	СКО %	< 10 см	< 20 см	< 30 см	
0	73,2	58,8	16,0	6,0	20,1	27,4	38	82	104	0,977
6	64,4	58,1	12,5	5,7	15,2	23,6	56	90	114	0,974
12	73,7	59,4	15,5	5,8	19,4	26,4	44	85	104	0,980
18	64,9	57,8	12,2	5,6	15,0	23,1	54	92	113	0,977
24	73,6	59,9	15,0	5,7	18,9	25,6	46	81	102	0,981
30	65,9	58,0	12,6	5,8	15,7	23,8	54	92	112	0,976
36	74,5	61,1	15,0	5,8	18,9	25,4	49	77	103	0,980
42	66,5	58,0	13,2	6,1	16,8	25,2	56	87	108	0,973
48	74,4	55,9	18,2	7,2	23,3	31,3	45	70	90	0,976

Обозначения аналогичны табл. 1

Таблица 7

**Результаты оценки прогностических расчетов уровня моря с заблаговременностью
0–48 часов для точки 6. 33 прогноза**

Заблаговременность, ч	Набл.	Прогноз	Оценка точности расчетов				Число прогнозов с ошибкой менее:			Rкор
	СКО, см	СКО, см	Ao	Ot%	СКО ошиб.	СКО %	< 10 см	< 20 см	< 30 см	
0	22,8	17,3	6,7	10,6	7,5	33,0	30	33	33	0,966
6	25,1	18,1	8,1	10,4	9,9	39,5	20	32	33	0,946
12	22,8	17,0	6,9	10,8	7,8	34,1	26	33	33	0,966
18	23,0	16,7	6,8	9,8	8,3	36,1	24	33	33	0,961
24	23,1	17,4	6,6	10,2	7,7	33,5	24	33	33	0,965
30	22,3	16,0	6,6	9,6	7,7	34,6	26	33	33	0,972
36	23,1	17,7	6,8	10,4	8,3	35,9	24	33	33	0,951
42	21,4	15,5	6,6	9,3	7,6	35,4	28	33	33	0,967
48	23,5	16,1	8,8	12,8	10,8	45,9	20	32	33	0,919

Обозначения аналогичны табл. 1

Заключение

Для акватории Баренцева и Белого морей выполнены диагностические и прогностические расчеты уровня моря для летне-осеннего сезона 2006 года. Проведено сравнение диагностических и прогностических расчетов с наблюдениями в 6 точках, расположенных в открытой части акватории Баренцева моря. Качество как диагностических, так и прогностических расчетов достаточно высокое.

В табл. 1 представлена средняя по всем заблаговременностям от 0 до 48 часов оправдываемость прогнозов (процентное отношение числа оправдавшихся прогнозов к общему числу прогнозов). Прогноз для заданной заблаговременности считается оправдавшимся, если его ошибка не превышает заданной величины 10, 20, 30 см. Наименьшая оправдываемость прогнозов (средняя по всем заблаговременностям) достигается в точке 4 и составляет 82,1 % при ошибке в прогнозе уровня моря меньше 30 см. В этой точке и самая большая абсолютная ошибка, равная 16,9 см. Наибольшая оправдываемость прогнозов достигается в точке 6, расположенной в центре моря, и составляет 100 % при ошибке в прогнозе уровня моря меньше 30 см (оправдываемость 99,8 % при ошибке меньше 20 см). Изменчивость уровня моря (приливы) в точке 6 меньше, чем в остальных точках, расположенных ближе к берегу. В этой же точке и самая маленькая абсолютная ошибка, равная 6,6 см. Анализ относительной ошибки показывает, что, наоборот, в точке 6 она больше, чем в других точках, и составляет 8,6 % (для сравнения, в точке 4 равна 7,3 %). Если судить о качестве прогнозов по относительной ошибке, то в точке 6, в центре моря, точность расчетов ниже, чем в прибрежных точках.

Для диагностического расчета оправдываемость рассчитывалась по временному ряду наблюдений и расчетов. Длина ряда различается для разных точек и составляет около двух месяцев. Оправдываемость для диагноза определяется как процентное отношение членов временного ряда, где ошибка расчетов не превышает заданной величины 10, 20 30 см, к общему числу членов временного ряда.

Следует отметить, что модель как в диагностических, так и прогностических расчетах занижает, по сравнению с фактическими значениями, максимальные и минимальные уровни моря. Максимальные уровни моря занижены в диагностических расчетах на 6–25 см, в прогностических расчетах – на 10–32 см. Причем только в точке 6 прогностические расчеты ближе к фактическим значениям, чем диагностические расчеты. Минимальные уровни моря занижены в диагностических расчетах на 10–53 см, в прогностических расчетах – на

11,5–50 см. Причем во всех точках, кроме точки 6, ближе к фактическим значениям прогностические расчеты, по сравнению с диагностическими расчетами. Изменчивость уровня по данным наблюдений (СКО наблюдений) выше, чем по модели (СКО расчетов), для точки 1 на 9,5 см, для точки 6 – на 4,8 см.

Процентное отношение среднеквадратической ошибки расчетов к СКО наблюдений (СКО%) показывает величину ошибки расчетов по сравнению с изменчивостью процесса. Для точки 1 это 20,6 %. Для сравнения, в неприливых морях по [5] за допустимую ошибку расчета принята величина $0,674\sigma$, то есть ошибка составляет 67,4 % СКО, а ошибка диагностических расчетов испытываемым методом – всего 20,6 % СКО. В приливых морях изменчивость уровня (СКО) очень велика, по сравнению с неприливыми морями, поэтому допустимая ошибка как % от СКО становится очень большой, например для точки 1 это 60 см. Все расчеты данным методом оправдываются на 100 %, если принять критерий $0,674\sigma$. Поэтому для приливого Баренцева моря посчитана оправдываемость при фиксированных допустимых ошибках 10, 20, 30 см, не зависящих от изменчивости процесса.

Результаты оценки прогностических расчетов при различной заблаговременности прогнозов для 6 пунктов Баренцева моря приведены в табл. 2–7. Самая низкая оправдываемость прогнозов для заблаговременности 48 часов в точке 3, где оправдались 93 прогноза из 125 (74,4 %) при допустимой ошибке <30 см. Самая высокая оправдываемость прогнозов в точке 6, где оправдались 33 прогноза из 33 (100 %) при допустимой ошибке <30 см. Зависимость оправдываемости от времени заблаговременности прогноза носит циклический характер, что вызвано периодической ошибкой расчета приливных колебаний уровня моря. Очевидно периодическая приливая компонента уровня моря доминирует над непериодической компонентой, вызванной ветром и неравномерным распределением температуры и солености. Заметное отклонение от цикличности и уменьшение оправдываемости происходит только при заблаговременности 48 часов, что можно объяснить значительным уменьшением точности расчета непериодической компоненты уровня моря.

Средняя по всем заблаговременностям оправдываемость прогнозов лежит в пределах 82–100 % при допустимой ошибке <30 см (табл. 1), что вполне соответствует нормативным требованиям.

На заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета от 24 апреля 2013 г. принято решение:

– метод краткосрочного прогноза уровня моря, скоростей течений и температуры воды (заблаговременностью до 48 часов) для Баренцева и Белого морей на основе трехмерной гидродинамической модели внедрить в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основного;

- рекомендовать авторам продолжить работу по совершенствованию метода, используя мезомасштабные атмосферные модели высокого разрешения; расширить спектр выходной продукции; дополнительно привлечь данные наблюдений; исследовать роль атмосферного воздействия по сравнению с приливом.

Список литературы

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 1. Баренцево море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Ф.С. Терзиева и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 280 с.

2. Лосев В.М. Гидродинамическая конечно-разностная модель регионального прогноза на ЭВМ CREY // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 334. – С. 69–90.

3. Научно технический отчет по теме «Обобщение данных по гидрометеорологическим условиям на акватории губы Териберская и вдоль трассы проектируемого трубопровода ШГКМ – губа Опасова и разработка локальных технических условий (ЛТУ)».

4. Попов С.К., Лобов А.Л., Елисов В.В., Батов В.И. Прилив в оперативной модели краткосрочного прогноза скоростей течений и уровня моря в Баренцевом и Белом морях // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 6. – С. 68–82.

5. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3 Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов.– М.: Триада Лтд, 2011. – 200 с.