

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ ПРОГНОЗОВ ВОЛНЕНИЯ ПО ОТЕЧЕСТВЕННЫМ ВОЛНОВЫМ МОДЕЛЯМ AARI-PD2 И РАВМ

Введение

Ветровое волнение относится к числу важнейших параметров, характеризующих состояние поверхности океана. Поэтому информация о волнении является наиболее затребованной со стороны различных групп пользователей. Это определяется разнообразием и масштабами различных видов морских операций и их чувствительностью к условиям окружающей среды и, прежде всего, к условиям ветрового волнения. В целом, экстремальные значения высот волн и скоростей ветра увеличивают риск для судов и сооружений в море, а также для персонала, привлекаемого к морским операциям. Менее экстремальные условия волнения хотя и не содержат прямой угрозы безопасности, но сильно влияют на производительность и эффективность работ. Степень эффективности прогнозов волнения зависит от их точности, заблаговременности и от способности потребителя правильно реагировать на полученную информацию. Таким образом, актуальность задач прогнозирования ветра и волнения очевидна.

Прогнозирование волнения - это процесс оценки того, как будут изменяться параметры волнения под действием ветра на водную поверхность. Зависимость полей волнения от полей ветра определяет тесную связь между волновыми и метеорологическими моделями. Поэтому вслед за развитием атмосферных моделей развиваются и волновые модели. Это отчетливо проявляется в течение последних 40 лет, когда атмосферные и волновые модели в той или иной степени совместно используются в оперативной работе национальных метеорологических центров.

С улучшением качества атмосферных моделей соответственно улучшалось и качество волновых моделей и, как следствие, точность выпускаемых прогнозов. Кроме того, по мере углубления понимания физических процессов, происходящих в океане и атмосфере, которые определяют механизмы взаимодействия волн с приводным слоем атмосферы, становится все более ясным, что эти механизмы являются значительно более сложными, чем это представлялось до сих пор.

В настоящее время для решения задач диагноза и прогноза ветрового волнения применяются математические модели, адекватно описывающие развитие ветроволновых процессов в открытых (глубоководных) и прибрежных (мелководных) районах морей и океанов. Большинство применяемых в настоящее время волновых моделей основаны на численном решении уравнения баланса волновой энергии, записанной в спектральной форме.

Волновые модели очень чувствительны к малейшим вариациям исходных данных, прежде всего, к вариациям скорости и направления ветра. Любые ошибки в рассчитанном поле ветра отражаются на точности расчетов характеристик волн. Поэтому для прогнозов полей волнения необходимы надежные данные о полях ветра.

В настоящее время в мировой практике в области моделирования ветрового волнения применяются несколько десятков волновых моделей. Их можно разделить на 4 группы: 1) спектральные дискретные, 2) спектральные параметрические, 3) интегральные параметрические, 4) прочие (эмпирические, энергетические, монохроматические и различные их комбинации) [1, 8, 10]. Дискретные модели подразделяются на поколения. Различие в поколениях заключается в степени подробности описания механизма нелинейного взаимодействия в спектре ветровых волн.

Модели всех типов позволяют получать интегральные характеристики волн 1-го уровня информативности (высоты волн, периоды и генеральное направление распространения волн). Дискретные модели, кроме того, дают возможность получать характеристики более высокого уровня информативности (частотный спектр, угловое распределение энергии, уклоны взволнованной поверхности и др.).

В последние годы в метеорологических службах стран мира эксплуатируется большое количество численных гидродинамических моделей, воспроизводящих процессы генерации, развития и распространения ветровых волн в широком пространственно-временном диапазоне [8]. Эти модели являются не только средством для изучения волновых процессов, но и служат инструментом для прогнозирования полей волнения с различной заблаговременностью. За рубежом наиболее известными прогностическими моделями волнения являются модели WAM Cycle 4, применяемая в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦССПП), и WAVEWATCH-III, применяемая в национальном метеорологическом центре США.

В России в рамках вычислительных технологий ГУ «Гидрометцентр России» функционируют глобальная спектрально-параметрическая модель AARI-PD2, разработанная в ГУ «АНИИ» совместно с ГУ «СПО ГОИН» и российская атмосферно-волновая модель (РАВМ), разработанная в Институте океанологии (ИО) РАН совместно с ГУ «ГОИН» и ВЦ РАН. Обе модели являются полностью российскими разработками. Они позволяют работать с отечественными атмосферными моделями и имеют перспективы дальнейшего развития. На основе этих моделей два раза в сутки составляются оперативные прогнозы волнения.

Упомянутые модели отличаются простотой, как в части описания функции источника, так и в подходе к ограничениям на форму спектра волн и учета волн зыби. Такой подход обеспечивает довольно высокую быстроту расчета поля волн при сохранении точности счета и повышает оперативность прогнозов волнения.

Предварительная проверка качества этих моделей выполнялась на этапе их разработки и авторских испытаний на диагностическом материале. Результаты диагностических расчетов характеристик волн (высота, период и др.) сопоставлялись с данными инструментальных измерений волн с помощью заякоренных буюв, расположенных в различных точках Мирового океана. Детальная проверка качества этих моделей на диагностическом материале убедительно продемонстрировала возможность их применения в оперативной практике [3]. Однако аналогичной проверки этих моделей на прогностическом исходном материале не производилось.

Проверка оправдываемости прогнозов волн во многих национальных метеорологических службах ведется на регулярной основе. В системе Росгидромета первоначальная проверка волновой модели выполняется на этапе ее внедрения, а статистика оправдываемости собирается периодически, чтобы следить за функционированием модели.

Что касается отечественных моделей AARI-PD2 и PABM, то они в предыдущие годы отдельно уже верифицировались путем их сопоставления с данными буйковых измерений. Однако детальной оценки качества прогнозов волн, составляемых по этим моделям, до сих пор не проводилось.

Цель данной работы состояла в том, чтобы оценить качество оперативных прогнозов полей волнения по моделям AARI-PD2 и PABM путем сопоставления с данными буйковых измерений характеристик волн. В качестве параметра оценки была выбрана значительная высота волны, наиболее объективно характеризующая состояние взволнованной поверхности моря.

1. Описание исходных материалов

Результаты прогнозов высот волн сопоставлялись с данными буйковых измерений высот волн на заякоренных буюв, расположенных вдоль западного и восточного побережий Северной Атлантики, принадлежащих США, Канаде и Англии.

Оценка качества прогнозов высот волн выполнялась за период с 5 октября по 31 декабря 2006 г. Прогностические поля волн считывались с оперативной базы данных SHOT. Фактические данные о высотах волн брались из Интернета по 4 заякоренным буюв. Сведения об этих буюв приведены в табл. 1.

Океанские буи обеспечивают данными измерений высоты волн с часовым интервалом. Сводки с этими данными собираются с помощью геостационарных метеорологических спутников и затем распространяются по Глобальной системе телесвязи (ГСТ) ВМО в коде SHIP. Точность измерений высоты волн составляет $\pm 0,2$ м. Для целей проверки качества прогнозов данные буев брались с 12-часовым интервалом.

Таблица 1

Сведения об использованных буях

Номера буковых станций	Координаты буев		Принадлежность
	φ	λ	
41002	32 °18' 30" N	75° 10' 01" W	США
44008	40 °30' 00" N	69° 25' 00" W	Канада
64045	59° 61' 00" N	11° 24' 02" W	Англия
62108	53° 30' 00" N	19° 30'00" W	Англия

Модели расчета полей волнения в Северной Атлантике привязаны к атмосферной модели CM-15, оперативно функционирующей в ГУ «Гидрометцентр России». В качестве исходных данных при выполнении диагностических и прогностических расчетов характеристик ветрового волнения использовались поля приземного давления атмосферы, рассчитанные на основе глобальной спектральной модели атмосферы (СМА) с горизонтальным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ по широте и долготе, пересчитываемые в поля ветра. Диагностический расчет выполнялся по синоптическим картам объективного анализа (ОА). Результат этого расчета на момент составления прогноза принимался в качестве исходного для прогноза волн.

Выпуск оперативных прогнозов по модели CM-15 осуществляется в ГУ «Гидрометцентр России» в рамках автоматизированной системы оперативной обработки информации (АСОИ), реализованной на ЭВМ XEON-4. Прогнозы выпускаются два раза в сутки по исходным срокам 00 и 12 ч. Максимальная заблаговременность прогнозов для срока 00 ч (утренний сеанс) составляет 84 ч, для срока 12 ч (вечерний сеанс) - 240 ч. Результаты прогнозов заносятся в оперативную базу данных «SHOT». Результаты прогнозов по модели AARI-PD2 распространяются внутренним пользователям, а также внешним пользователям по каналам ГСТ и Интернет. Основные базы данных с выходной продукцией являются циклическими со сроком хранения 4-10 сут. Чтение данных прогнозов в оперативную память ЭВМ осуществляется автоматически в соответствии с заданной исходной датой и сроком. Результаты прогнозов по модели PABM используются только внутренними пользователями.

2. Некоторые особенности режима волнения в районе выбранных буев

Северная часть Атлантического океана отличается большими размерами, что обуславливает большие различия в режиме ветров и волнений в отдельных ее районах. Характер волнения определяется главным образом размерами, глубиной, скоростью перемещения циклонов, положением ложбин, гребней, атмосферных фронтов, зон конвергенции и дивергенции ветровых потоков. Чем меньше размеры проходящего циклона и чем больше скорость его перемещения, тем более сложной является картина распределения высот волн. Все эти факторы обуславливают большую изменчивость ветра и волн.

Наиболее устойчивое и сильное волнение наблюдается в ситуациях, когда над океаном происходят процессы формирования глубоких и обширных центральных депрессий. Такие депрессии бывают иногда малоподвижными, сохраняются несколько дней, обуславливая сильные продолжительные ветры и сильное волнение над большими районами океана.

Анализ синоптических условий за рассматриваемый период в районах заякоренных буев указывает на их значительное различие. Рассматриваемый период охватывает осенне-зимние месяцы года (октябрь-декабрь), когда над юго-западной частью Северной Атлантики формируются активные циклоны, перемещающиеся сериями в северо-восточном направлении, и при подходе к британским островам они достигают своего максимального развития. Поэтому средняя значительная высота волны по данным буев, расположенных в северо-восточной части Северной Атлантики, может более чем в два раза превышать среднюю значительную высоту волн, измеренных на буюх, расположенных в юго-западной части Северной Атлантики. Наибольшая активизация циклонов приходится на декабрь месяц. Статистические характеристики рядов наблюдений за высотами волн для выбранных буев приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Статистические характеристики рядов наблюдений за высотами волн
для 4 буев, расположенных в Северной Атлантике,
за период октябрь–декабрь 2006 г.**

Номер буя	\bar{h}	Me	Σ	min	max	k_v	σ
41002	1,8	1,6	157	0,7	4,6	0,69	0,834
44008	2,1	1,8	181	0,6	5,9	1,34	1,157
64045	4,8	4,6	421	1,9	10,3	2,98	1,725
62108	4,7	4,6	414	1,6	10,5	3,28	1,810

Примечание: \bar{h} - средняя высота волны, Me - медиана, Σ – накопленная сумма высот волн, min и max – минимальная и максимальная высоты волн в ряду наблюдений, k_v - коэффициент изменчивости, σ - среднеквадратическое отклонение.

Табл. 2 указывает на существенное различие режима волнения в западной и восточной части Северной Атлантики, что, как будет показано ниже, существенно отражается на оценке прогнозов волнения. Из таблицы видно, что волны в районе буев 41002 и 44008, расположенных в юго-западной (более спокойной) части океана, характеризуются относительно малой изменчивостью и находятся в диапазоне от 0,6 до 5,9 м. За этот же период в восточной части Северной Атлантики в районе расположения буев 64045 и 62108 повторяемость штормов больше и изменчивость высот находится в диапазоне от 1,6 до 10,5 м.

3. Краткая характеристика волновых моделей

3.1 Модель AARI-PD2

Модель AARI-PD2 (для краткости обозначим ее как модель M1) реализована как глобальная, охватывающая весь Мировой океан за исключением внутренних морей, и как региональная, охватывающая моря арктического бассейна.

В основе модели лежит уравнение переноса спектральной энергии волн.

В соответствии с концепцией Хассельмана о том, что спектр ветровых волн сохраняет по мере развития волн универсальную форму, член слабонелинейного взаимодействия в уравнении баланса спектральной энергии волн стало возможным описать аналитической зависимостью. Это позволило модель ветрового волнения выразить системой трех уравнений для параметров ω_0 - частоты спектрального максимума, m_0 - нулевого момента спектра (дисперсии) и $\bar{\theta}$ - среднего направления ветровых волн. Такой подход, несмотря на простоту, удобен при его практической реализации [1, 2, 7, 10].

Модель M1, с одной стороны, в силу использования параметризации слабонелинейного переноса энергии в спектре волнения, относится к усовершенствованному типу моделей второго поколения, а с другой стороны, поскольку в ней учитывается взаимосогласованное взаимодействие волн с пограничным слоем атмосферы, ее можно отнести к моделям четвертого поколения.

Модель состоит из трех блоков:

- 1) блок, включающий параметрическую модель ветрового волнения, которая описывается тремя параметрами: частотой спектрального пика, нулевого момента спектра и генерального направления распространения волн;
- 2) блок, включающий спектральную модель эволюции зыби;
- 3) блок взаимодействия между ветровыми волнами и зыбью.

Модель глобальная, т.е. область прогноза охватывает весь Мировой океан за исключением внутренних морей. Горизонтальное разрешение модели $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ по широте и

долготе. Сеточная область состоит из 10080 узлов (70x144). Прогноз по этой модели считается два раза в сутки с выдачей результатов на моменты времени 00, 12, 24, 36, 48, 60 и 72 ч.

3.2. Модель PABM

Региональная атмосферно-волновая модель PABM (для краткости обозначим ее как модель M2), так называемая модель «узконаправленного приближения» углового спектра волн, является совместной разработкой ИОРАН и ГОИН [4–6, 12]. Основное отличие модели «узконаправленного приближения» от известных волновых моделей состоит в том, что один из членов функции источников и стоков уравнения переноса волновой энергии – член, описывающий нелинейный обмен энергией в спектре волн, записывается в более простом по сравнению с традиционными виде. Это упрощение заключается в следующем. Интеграл нелинейных взаимодействий сводится к дифференциальному виду регулярной процедурой разложения исходного интеграла в ряд по малому параметру – «параметру узконаправленности», который оказывается малым для реальных функций углового распределения энергии в двумерном спектре волн. Предлагаемое упрощение является первой строго обоснованной с теоретической точки зрения процедурой среди известных решений. Впервые оно было предложено в работах академика В.Е. Захарова и развито в работах М.М. Заславского.

Гипотеза об узконаправленности углового спектра была подтверждена для простых условий волнообразования на основе детального анализа натуральных измерений углового распределения энергии волн. Для сложных условий волнообразования в модели PABM разработан ряд приемов, которые позволяют учесть и поворот ветра, и изменение его скорости при прохождении над океаном активных циклонов.

Модель региональная, область прогноза охватывает Северную Атлантику. Границы области прогноза: южная – 20° с.ш., северная – 80° с.ш., западная –85° з.д. и восточная – 20° в.д. Разрешение модели по горизонтали 2,5x2,5°. Результаты прогноза выдаются на моменты времени 12, 24, 36, 48, 60 и 72 ч.

4. Схема расчета и методика оценки качества прогнозов

Схема расчета прогнозов высот волн показана на рис. 1.

Счет начинается за 24 ч до момента прогноза t_0 . В начале счета состояние моря принимается спокойным ($h = 0$). Предполагается, что за 24 ч рассчитанное поле волнения адаптируется к реальному волнению. Таким образом, поле волнения, рассчитанное на момент t_0 , принимается как исходное для расчета прогноза.

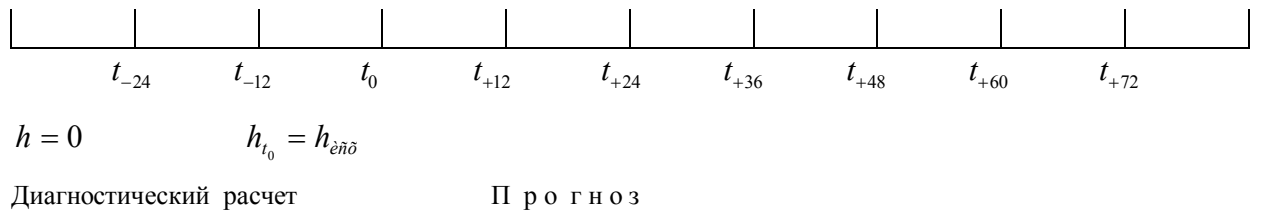


Рис. 1. Схема расчета диагностических и прогностических полей волнения.

Оценка оправдываемости высот волн осуществлялась в соответствии с требованиями Наставления [9]. Критерием оправдываемости единичного прогноза служит условие

$$\left(\frac{h_{\text{прогн.}} - h_{\text{наб.}}}{h_{\text{наб.}}} \right) * 100 \leq 30\%, \quad (1)$$

где $h_{\text{наб.}}$ – наблюдаемая высота волны, $h_{\text{прогн.}}$ – прогностическая высота волны. Прогноз считается оправдавшимся, если выполняется условие (1). При $h_{\text{наб.}} \leq 2$ м прогноз считается оправдавшимся при любой действительной высоте волны.

Общая оправдываемость (обеспеченность) прогноза (%) рассчитывается по формуле

$$P = \frac{m}{n} * 100, \quad (2)$$

где m – количество оправдавшихся прогнозов, n – общее количество прогнозов.

Для более универсальной и объективной проверки качества прогнозов привлекались дополнительные статистические характеристики, не рекомендованные Наставлением [9]. К ним относятся:

- $\bar{\Delta}$ - средняя ошибка прогноза или систематическое отклонение: положительное значение $\bar{\Delta}$ указывает на систематическое завышение прогностических данных по отношению к наблюдаемым, а отрицательное значение $\bar{\Delta}$ – на систематическое занижение;

- $|\bar{\Delta}|$ - средняя абсолютная ошибка;

- \bar{q} - средняя относительная ошибка (%), вычисляемая по формуле

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{h_{\text{прогн.}} - h_{\text{факт.}}}{h_{\text{факт.}}} \right) * 100; \quad (3)$$

- \bar{S} - среднеквадратическая ошибка прогноза, вычисляемая по формуле

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{\sum (h_{\text{прогн.}} - h_{\text{наб.}})^2}{N}}; \quad (4)$$

– коэффициент линейной корреляции между фактическими и спрогнозированными высотами волн R .

Эффективность прогноза оценивалась по формуле

$$SS = 1 - \frac{S_{\text{методический}}}{S_{\text{инерционный}}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{методический}}$ – стандартная ошибка методического прогноза, $S_{\text{инерционный}}$ – стандартная ошибка инерционного прогноза. Величина SS варьирует от 0 до +1. Чем ближе величина SS к единице, тем больше выигрыш методического прогноза над инерционным прогнозом.

5. Результаты оценки прогнозов и их анализ

Результаты статистических оценок успешности прогнозов высот волн по моделям AARI-PD2 и PABM для четырех закоренных буюв приведены в табл. 3–6.

Таблица 3

Статистические оценки успешности прогнозов высот волн по моделям AARI-PD2 (M1) и PABM (M2) для буюа 41002

		Заблаговременность	$\bar{\Delta}$	$ \bar{\Delta} $	\bar{S}	\bar{q}	R	P	ΔP	SS
Методический прогноз	M1	24	0,00	0,41	0,56	24	0,74	91	+8	0,42
		48	0,13	0,50	0,68	31	0,57	91	+7	0,46
		72	0,31	0,59	0,81	37	0,63	92	+9	0,36
	M2	24	-0,14	0,62	0,87	36	0,42	86	+3	0,10
		48	-0,05	0,60	0,71	31	0,43	86	+2	0,43
		72	-0,01	0,54	0,82	32	0,55	86	+3	0,35
Инерционный прогноз	24	-0,02	0,69	0,97	40	0,30	83			
	48	-0,07	0,91	1,25	56	-0,17	84			
	72	0,04	0,90	1,26	54	-0,70	83			

Таблица 4

Статистические оценки успешности прогнозов высот волн по моделям AARI-PD2 (M1) и PABM (M2) для буюа 44008

		Заблаговременность	$\bar{\Delta}$	$ \bar{\Delta} $	\bar{S}	\bar{q}	R	P	ΔP	SS
Методический прогноз	M1	24	0,26	0,70	0,91	41	0,74	85	+17	0,13
		48	0,38	0,78	0,98	49	0,68	82	+13	0,34
		72	0,33	1,15	0,93	46	0,61	87	+15	0,20
	M2	24	-0,18	0,90	1,20	57	0,41	81	+13	-0,14
		48	-0,00	0,89	1,12	51	0,42	82	+13	0,25
		72	0,05	0,97	1,22	59	0,22	72	+1	-0,05
Инерционный прогноз	24	-0,02	0,78	1,05	55	-0,02	68			
	48	0,00	1,13	1,49	87	-0,02	69			
	72	0,31	1,50	1,16	80	-0,16	72			

**Статистические оценки успешности прогнозов высот волн по моделям
AARI-PD2 (M1) и PABM (M2) для буя 64045**

		Заблаговременность	$\bar{\Delta}$	$ \bar{\Delta} $	\bar{S}	\bar{q}	R	P	ΔP	SS
Методический прогноз	M1	24	0,52	1,23	1,38	24	0,79	74	+10	0,03
		48	0,54	1,24	1,57	25	0,76	69	+18	0,27
		72	0,79	1,53	2,10	31	0,69	61	+11	0,07
	M2	24	-0,30	1,05	1,39	22	0,67	80	+16	0,21
		48	0,08	1,10	1,47	24	0,65	70	+19	0,53
		72	0,14	1,10	1,44	24	0,66	76	+26	0,36
Инерционный прогноз	24	0,02	1,36	1,75	32	0,47	64			
	48	0,06	1,74	2,16	41	0,19	51			
	72	0,09	1,92	2,31	46	0,14	50			

**Статистические оценки успешности прогнозов высот волн по моделям
AARI-PD2 (M1) и PABM (M2) для буя 62108**

		Заблаговременность	$\bar{\Delta}$	$ \bar{\Delta} $	\bar{S}	\bar{q}	R	P	ΔP	SS
Методический прогноз	M1	24	0,59	1,18	1,54	27	0,78	74	+11	0,67
		48	0,71	1,38	1,69	30	0,78	58	-1	0,13
		72	0,98	1,69	2,26	36	0,71	53	-2	-0,21
	M2	24	-0,38	1,16	1,43	26	0,70	75	+12	0,12
		48	-0,18	1,18	1,69	27	0,68	74	+15	0,13
		72	-0,08	1,16	1,51	26	0,69	75	+20	0,19
Инерционный прогноз	24	0,10	0,01	1,63	28	0,59	63			
	48	0,11	1,52	1,94	36	0,44	59			
	72	0,12	1,52	1,87	36	0,47	55			

На основе анализа табл. 3–6 можно сделать следующий вывод.

Обе модели дают довольно большой разброс в статистических оценках прогнозов. Этот разброс может быть объяснен различными причинами, заложенными как в самих моделях, так и в методах получения исходных данных о полях ветра. Кроме того, ошибки прогнозов зависят от диапазона изменчивости высот волн в районе расположения буев. Меньшие значения абсолютных ошибок соответствуют меньшей изменчивости высот волн. Наиболее устойчивые статистические оценки прогнозов высот волн по двум моделям получаются после их осреднения по всем рассматриваемым буям.

На рис. 2а–2е приведены графики сопоставления временного хода спрогнозированных на различные сроки и измеренных высот волн в районе буя 64045, расположенного в восточной части Северной Атлантики. На этих рисунках сплошной линией показан ход фактических значений высот волн, а пунктиром - ход расчетных значений высот волн.

Ниже дается краткий анализ статистических оценок оправдываемости прогнозов, осредненных по всем буюм.

1. Анализ результатов прогнозов высот волн показывает, что оправдываемость прогнозов по обеим моделям, осредненная по всем буюм, отвечает требованиям Наставления [9]. Средняя оправдываемость прогнозов по модели М1 составляет на первые сутки – 81 %, на вторые – 75 % и на третьи – 73 %, а по модели М2 – 81, 78 и 77 % соответственно. Видно, что на вторые и третьи сутки оправдываемость прогнозов по модели М2 выше, чем по модели М1.

2. Анализ средних ошибок прогнозов $\bar{\Delta}$ (систематические ошибки) указывает на то, что модель М1 дает систематическое завышение высот волн на 0,34 м - на первые сутки, на 0,44 м – на вторые сутки и 0,60 м – на третьи сутки. Модель М2, наоборот, дает занижение, но незначительное: на 0,25 м – на первые сутки, на 0,04 м - на вторые сутки и на 0,03 м – на третьи сутки. При этом систематическая ошибка по модели М1 растет с увеличением заблаговременности, а по модели М2 – уменьшается.

3. Средние абсолютные ошибки прогнозов по модели М1 и по модели М2 одного порядка. По модели М1 они составляют 0,88 м на первые сутки, 0,98 м на вторые сутки и 1,24 м на третьи сутки, а по модели М2 - 0,93, 0,94 и 0,94 м соответственно и почти не зависят от заблаговременности прогноза.

4. Средние квадратичные ошибки по обеим моделям оказались одного порядка. По модели М1 они составили на первые сутки – 1,10, на вторые – 1,23 и на третьи – 1,53, а по модели М2 – 1,27, 1,31 и 1,33 м соответственно.

5. Средние относительные ошибки по обеим моделям растут с увеличением заблаговременности и лежат в диапазоне от 24 до 36 %. Их величина также зависит от изменчивости волн.

6. Анализ табл. 3–6 обнаруживает явное преимущество методических прогнозов перед инерционными. Среднее превышение обеспеченности методических прогнозов над обеспеченностью инерционных прогнозов колеблется в пределах от 8 до 13 %.

7. На рис. 2а–2е видно, что во временном ходе прогностических значений высот волн, рассчитанных по модели М1, наблюдается несколько значительных «выбросов», происхождение которых, по-видимому, связано с погрешностями в прогнозах ветра. В модели М2 таких больших «выбросов» не наблюдается.

Эффективность методических прогнозов по модели М1 уменьшается со временем и составляет в среднем по всем буюм 12 % на первые сутки, 9 % на вторые сутки и 8 % на третьи сутки, в то время как эффективность прогнозов по модели М2, наоборот, увеличивается со временем и составляет 11 % на первые сутки, 12 % на вторые сутки и 13 % на третьи сутки.

В целом, статистические показатели успешности прогнозов указывают на некоторое преимущество модели М2 перед с моделью М1.



Рис. 2а. Сопоставление временного хода спрогнозированных по модели М1 и измеренных высот волн в районе буя 64045 (заблаговременность 24 ч)

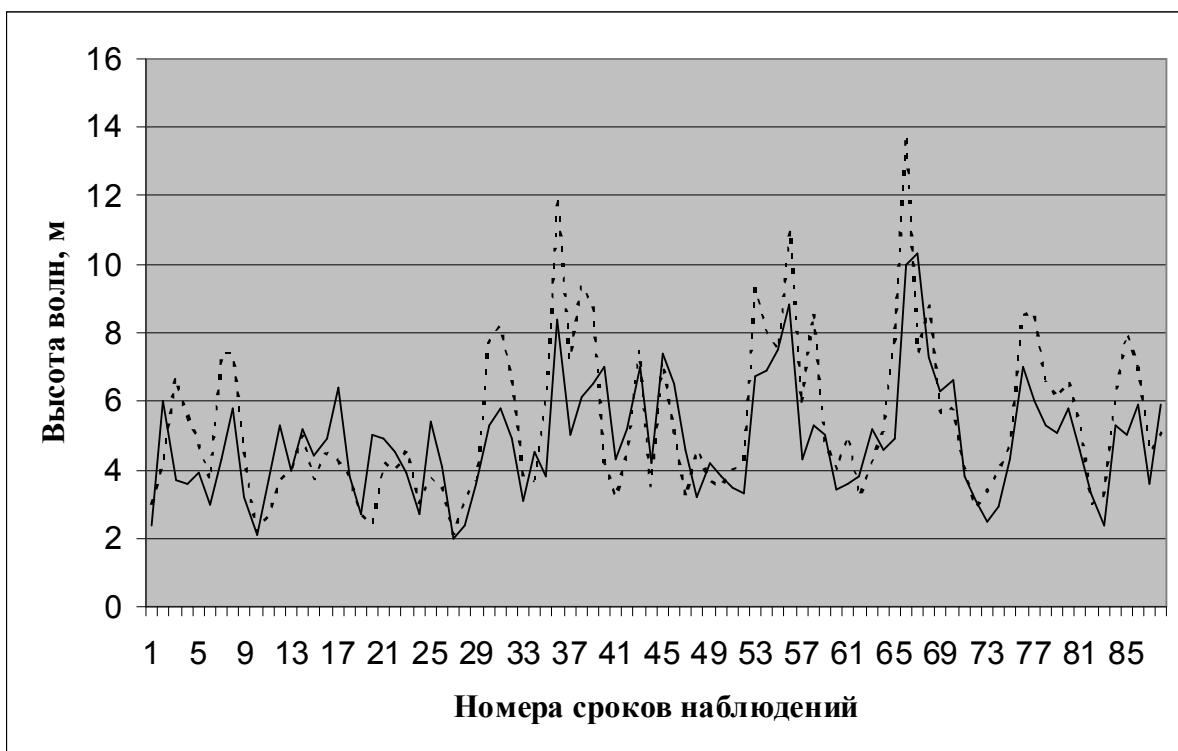


Рис. 2б. Сопоставление временного хода спрогнозированных по модели М1 и измеренных высот волн в районе буя 64045 (заблаговременность 48 ч)

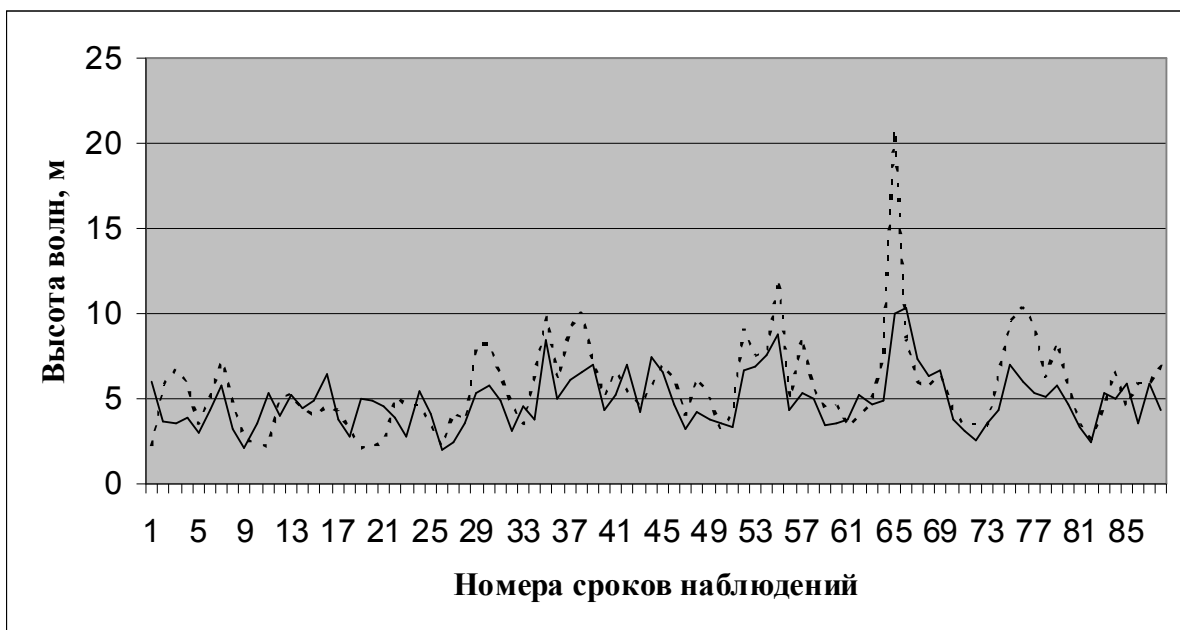


Рис. 2в. Сопоставление временного хода спрогнозированных по модели М1 и измеренных высот волн в районе буя 64045 (заблаговременность 72 ч)

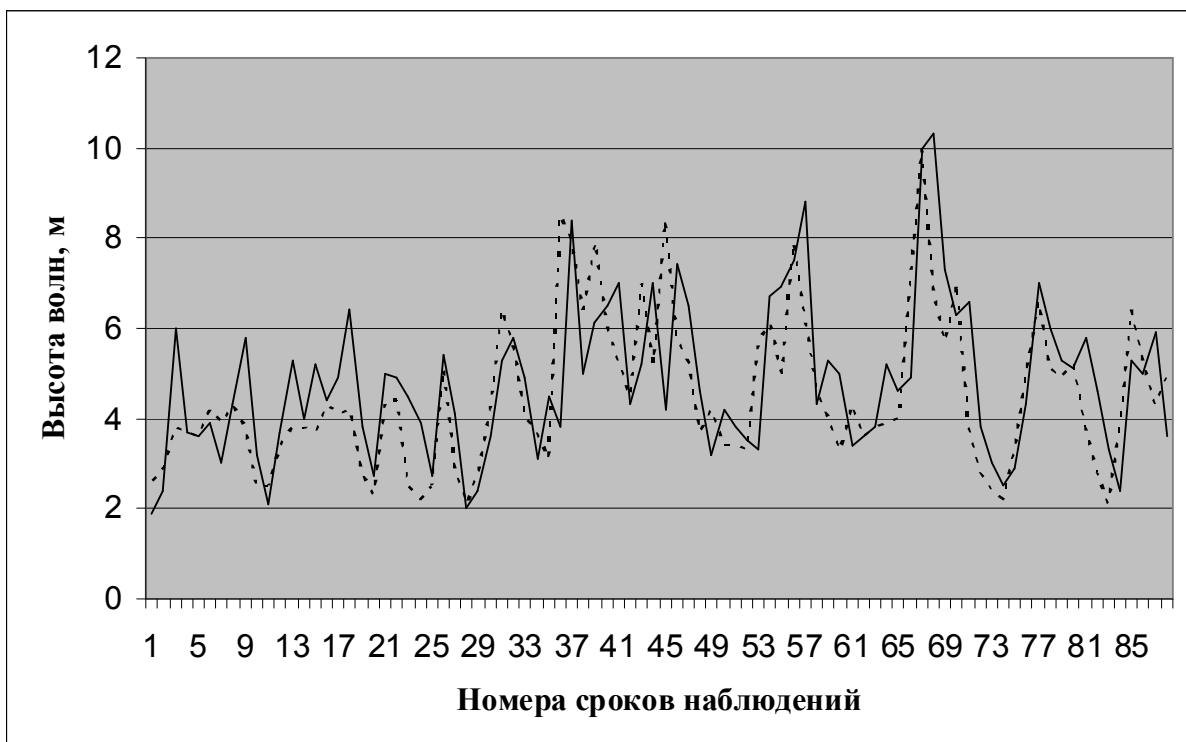


Рис. 2г. Сопоставление временного хода спрогнозированных по модели М2 и измеренных высот волн в районе буя 64045 (заблаговременность 24 ч)

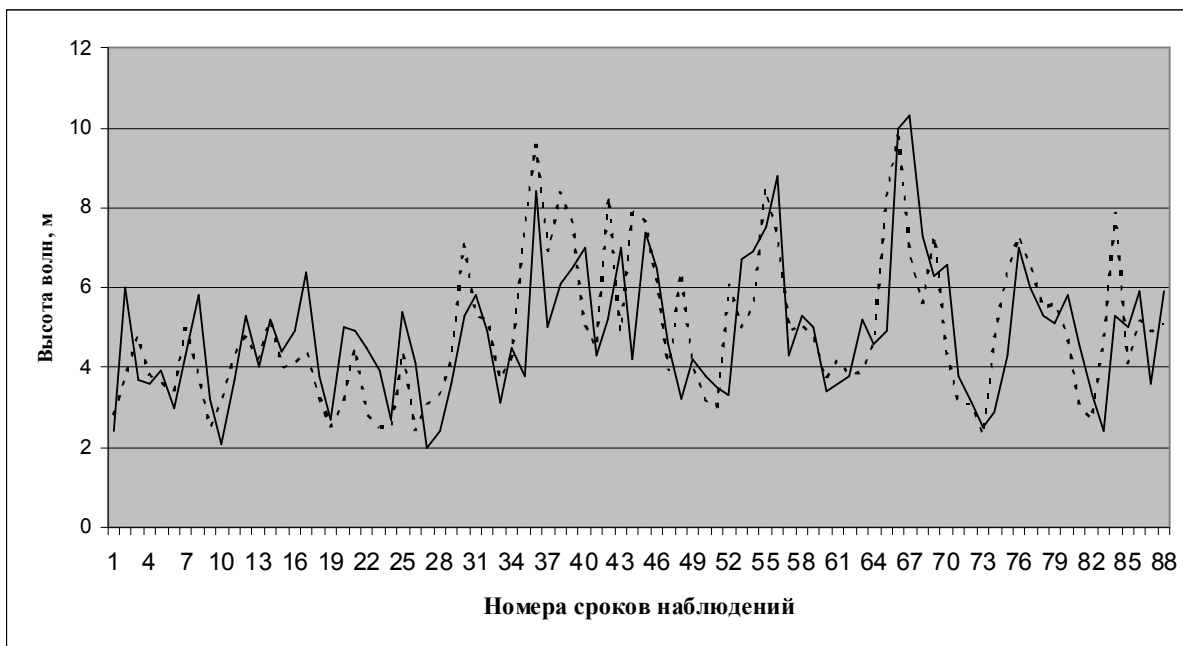


Рис. 2д. Сопоставление временного хода спрогнозированных по модели M2 и измеренных высот волн в районе буйа 64045 (заблаговременность 48 ч)

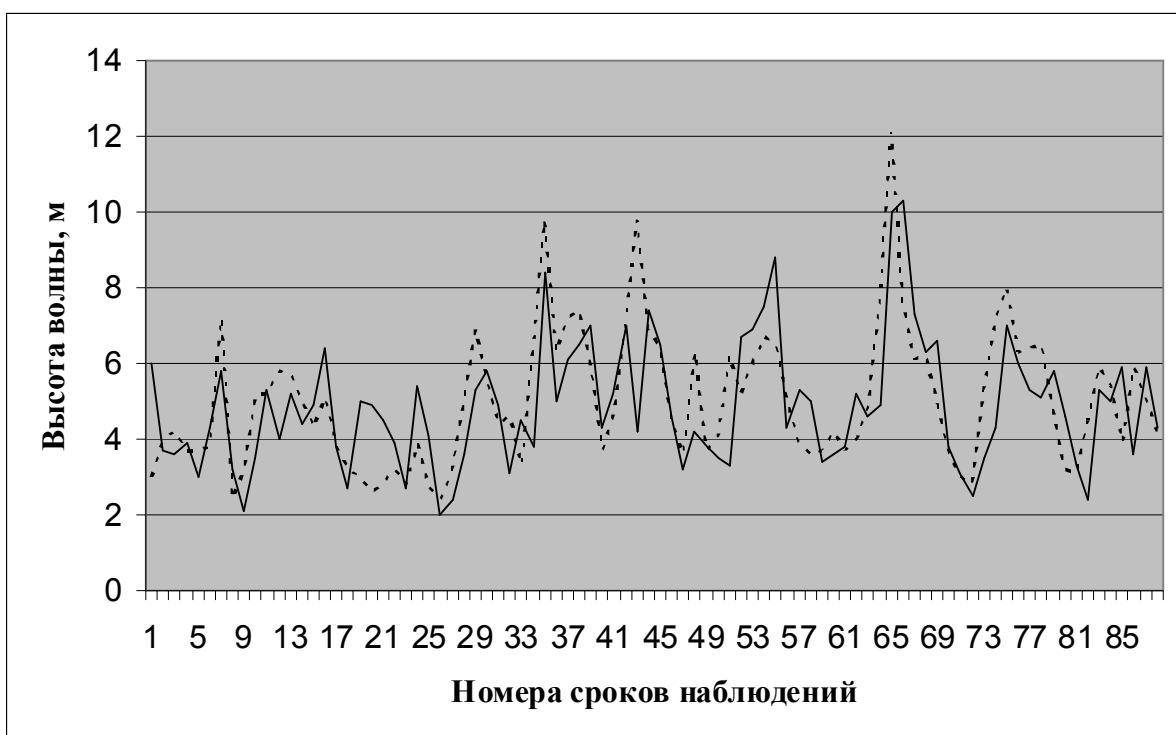


Рис. 2е. Сопоставление временного хода спрогнозированных по модели M2 и измеренных высот волн в районе буйа 64045 (заблаговременность 72 ч)

Заключение

Обобщая результаты выполненной работы, можно заключить, что сравнительный анализ прогнозов значительных высот волн по моделям AARI-PD2 (M1) и PABM (M2) с данными буйковых измерений в Северной Атлантике дал удовлетворительные результаты. Полученные статистические оценки успешности прогнозов высот волн по двум моделям указывают на то, что обе они отвечают требованиям Наставления [9] и могут успешно применяться в оперативной работе. Было обнаружено некоторое преимущество модели M2 перед моделью M1.

Прогнозы высот волн по модели M1 существенно завышены по сравнению с данными буйев в среднем на 0,5 м, а прогнозы волн по модели M2 дают незначительное занижение высот волн по отношению к измеренным данным.

Имеющие место расхождения статистических оценок в моделях, по-видимому, связаны с методиками расчета ветра, применяемыми в моделях, которые и определяют особенности исходного синоптического материала, использованного при прогнозах ветрового волнения. Это весьма важный момент, влияющий на точность прогнозов, так как структура поля ветра такова, что над открытыми пространствами океана для нее характерна большая изменчивость параметров ветра (скорости и направления) во времени и в пространстве. Эта изменчивость обусловлена воздействием большого количества локальных факторов, в результате воздействия которых скорость и направление ветра в точке могут существенно отличаться от некоторых средних величин, характеризующих течение крупномасштабных атмосферных процессов. Рассчитанный ветер, хотя и относится к определенной точке пространства, характеризует среднюю скорость потока над значительной областью, т.е. учитывает значение скорости ветра в соседних точках. Любые ошибки в исходных данных поля ветра отражаются на результатах оценки прогнозов волнения. Известно, что ошибка в скорости ветра более 15% приводит к ошибкам 15-30 % для высот волн и 30-70 % для энергии волн, что часто является неприемлемым при практическом применении.

Еще более сложная структура полей ветра вблизи побережий морей, в особенности если они имеют сложную конфигурацию береговой линии при наличии островов и полуостровов и расположении поблизости горных хребтов, которые являются препятствием для воздушных потоков.

Другим важным аспектом в поле ветра, не учитываемым в метеорологических моделях, является порывистость (шквальность) ветров, особенно сильно проявляющихся в приземном слое атмосферы. Сильные шквальные ветры, как правило, связаны с прохождением холодных атмосферных фронтов. Кратковременные усиления ветра при таких шквалах могут достигать ураганной силы, вызывая быстрый рост высоты волны. Но такие явления относятся к так

называемым «подсеточным эффектам», не улавливаемым метеорологическими моделями с грубым разрешением.

В работе [11] показано, что турбулентность приповерхностного ветра ведет к усилению развития волновых процессов с увеличением до 20-80 % по высоте волны. Уровень турбулентности во многом зависит от того, откуда в прогностическую точку приходят воздушные массы. Ветры северных направлений, как правило, являются более сильными и продолжительными, обуславливая развитие интенсивного волнения. При этом следует отметить, что усиление ветра северных направлений происходит быстрее, а ослабление медленнее.

Ошибки в расчете волн варьируют от точки к точке в зависимости от структуры ветроволнового поля. При этом пространственное распределение ошибок различно в полях ветра и в полях волнения. Волновые условия в конкретной точке как бы интегрируют во времени и в пространстве эффект предыдущих ветров над океаном, что не всегда дает возможность обнаружить источник ошибок расчета волн.

На это накладываются ошибки, связанные с недостаточным учетом мезомасштабных подсеточных полей ветра, обусловленных локальными конвективными процессами и эффектами орографии прибрежных районов моря. Эти эффекты могут увеличивать или уменьшать силу ветра почти вдвое. Для учета этих эффектов требуются атмосферные модели с высоким пространственно-временным разрешением.

В связи с анализом ошибок прогноза высот волн следует иметь в виду особенности срочных наблюдений за высотами волн, которые обычно используются для этой цели. При работе с данными срочных наблюдений за волнами используется значение высоты волны в срок наблюдения, при этом нет никакой информации о том, как ведут себя ветер и волны между сроками наблюдений. Таким образом, истинное значение высоты волны оказывается неизвестным. Кроме того, элементы ветровых волн обладают большей пространственной изменчивостью, чем элементы волн зыби. Эта особенность определяет различную статистическую структуру полей ветровых волн и волн зыби.

Важно также отметить, что в океане часто наблюдаются так называемые «резонансные эффекты», создаваемые наложением нескольких систем волн, близких по направлению и периоду. При этом возникают экстремально высокие волны при относительно умеренных скоростях ветра. Но такие эффекты также не учитываются волновыми моделями.

Все указанные выше факторы вносят вклад в ошибку прогноза высот волн и, возможно, именно они приводят к значительным «выбросам» в ошибках прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абузяров З.К.* Морское волнение и его прогнозирование. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 166 с.
2. *Давидан И.Н., Лавренов И.В., Пасечник Т.А. и др.* Математическая модель и метод оперативных расчетов ветрового волнения на морях СССР // *Метеорология и гидрология.* – 1988. – № 11. – С. 81–90.
3. *Дымов В.И., Пасечник Т.А., Лавренов И.В., Давидан И.Н., Абузяров З.К.* Сопоставление результатов расчетов по современным моделям ветрового волнения с данными натурных измерений // *Метеорология и гидрология.* – 2004. – № 7. – С. 87–94.
4. *Захаров В.Е., Заславский М.М.* Зависимость параметров волн от скорости ветра, продолжительности его действия и разгона в слабо турбулентной теории ветровых волн // *Известия АН СССР.* – ФАО. – 1983. – Т.19. – № 4. – С. 406–415.
5. *Захаров В.Е., Заславский М.М.* Кинетическое уравнение и колмогоровские спектры в слаботурбулентной теории ветровых волн // *Известия АН СССР. Сер. ФАО.* – 1982. – Т. 18. – № 9. – С. 970–980.
6. *Захаров В.Е., Заславский М.М.* Форма энергонесущих компонент спектра // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* – 1983. – № 3. – С. 282–290.
7. *Лавренов И.В.* Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. – СПб.: Гидрометеиздат, 1998. – 499 с.
8. *Матушевский Г.В.* Современные модели расчета ветрового волнения // *Метеорология и гидрология.* – № 6. – 1995. – С. 51-62.
9. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 143 с.
10. Проблемы исследования и математического моделирования ветрового волнения / под ред. И.Н. Давидана. – СПб.: Гидрометеиздат, 1995. – 472 с.
11. *Cavaleri L.* Meteorological Requirements for wave modeling // WMO/TD. – № 583. – Report № 29. – 1993. – P. 15.
12. *Zakharov V.E., Zaslavskii M.M., Matushevskii G.V., Kabatchenko I.M., Polnikov V.G.* // Conceptually new wind wave model. The Wind-Driven Air-Sea Interface, Proc. ASI-99. – Sydney, Australia, 1999. – P. 159–164.