

Вопросы оперативного применения численных прогностических моделей ветрового волнения в Гидрометцентре России

Информация о ветре и ветровом волнении имеет огромное значение для обеспечения эффективности и безопасности различных видов морской деятельности на побережье морей и в открытых водах Мирового океана. Поэтому она является наиболее затребованной потребителями, связанными с морем.

Информация о ветровом волнении используется как для оперативного обслуживания морских операций, так и для получения необходимых расчетных параметров, из которых исходят при проектировании различных типов судов, морских платформ, планирования морских хозяйственных комплексов и т.д.

Признание значимости ветрового волнения находит отражение также в том, что многие из национальных и международных исследовательских программ по изучению океана предусматривают специальные разделы или проекты относящиеся к проблематике исследования и прогноза ветрового волнения.

В настоящее время самым мощным средством, используемым при решении задач диагноза и прогноза ветрового волнения являются математические модели, описывающие развитие ветро-волновых процессов на глубокой воде и мелководье. При этом успешное решение задачи расчета и прогноза ветрового волнения зависит от качества физической модели, способов ее численной реализации и от точности задания поля ветра.

Практические приложения таких моделей составляют основу современных методов к прогнозу параметров ветрового волнения. Такой подход является наиболее перспективным и активно развивается в ведущих мировых исследовательских центрах. Вместе с тем не утрачивают своей значимости и упрощенные эмпирические и полуматематические модели волнения, позволяющие выявлять и анализировать особенности волновых процессов. Такой анализ может служить отправной точкой для более детального исследования ветрового волнения с использованием более сложных моделей.

Для определения возможностей современных моделей волнения осуществляются международные программы сравнения моделей (наиболее известные из них программы JONSWAP и WAM). Наиболее продвинутые модели ветрового волнения основаны на численном решении уравнения баланса энергии волн в спектральном представлении, описывающего эволюцию спектра волн под действием внешних полей, одним из которых является поле ветра.

Оценки различных компонентов, стоящих в правой части уравнения, показывают их различные пространственно-временные масштабы, в которых проявляются те или другие эволюционные механизмы, определяющие поведение поля ветрового волнения. Изучение механизмов, формирующих спектр, в настоящее время является одной из центральных проблем моделирования ветрового волнения.

Большинство зарубежных метеорологических центров разрабатывают новые или развивают наиболее продвинутые прогностические модели ветрового волнения, включающие те или другие элементы описания механизмов развития, распространения и затухания волн. Наиболее известными из зарубежных моделей являются спектральная дискретная модель WAM с ее модификациями, применяемая в Европейском Центре среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) и модель WAVEWATCH (WW3), по которой даются прогнозы волнения Службой погоды США [7-9]. В России это спектрально-параметрическая модель AARI-PD2, которая применяется в оперативной практике Гидрометцентра России [3,5,6].

Несмотря на интенсивные исследования ветрового волнения, которые проводятся в развитых странах в последние годы, и наличие международных проектов и общепризнанных фундаментальных теоретических и экспериментальных результатов, проблема адекватного

математического моделирования ветрового волнения остается открытой. Это связано с недостаточным точным описанием физических механизмов, способных реалистически воспроизводить эволюцию ветровых волн и зыби в океане. Изучение и расчет ветрового волнения в океане выполняется с помощью математических моделей, которые все более и более усложняются. Однако в плане практического применения для оперативных целей они должны быть существенно упрощены и приспособлены к существующим оперативным технологиям диагноза и прогноза полей давления или полей ветра. Проблема эта не совсем тривиальная и требует нахождения оптимальных подходов, удовлетворяющих как прогнозистов, так и потребителей.

В институтах Росгидромета (ГОИН, СПО ГОИН, ААНИИ, Гидрометцентр России) и Российской Академии наук (РАН) (ИОРАН, ВЦ РАН и др.) проводятся широкие работы по моделированию ветрового волнения и созданию методов расчета (прогноза) параметров волн на морях и океанах. Разработанные модели по физическому содержанию и точности расчетов соответствуют мировому уровню. Проведенные численные эксперименты с этими моделями дали удовлетворительные результаты и привели к необходимости их внедрения в оперативную практику.

Благодаря практической направленности, характерной для работ этих институтов, их идеи и результаты оказывали решающее влияние на развитие теории и практики численного прогноза ветрового волнения в нашей стране на протяжении последних 40 лет, что привело к созданию современных методов и технологий оперативного диагноза и прогноза параметров ветрового волнения для различных акваторий морей и океанов.

Следует отметить, что математические модели ветрового волнения принадлежат к сфере «высоких технологий» и для своей реализации требуют ЭВМ большой производительности. Из-за отсутствия до недавнего времени таких ЭВМ наблюдалось некоторое отставание в данной области от зарубежных исследований.

Переход в 1996 г. на качественно новую вычислительную технику (суперЭВМ CRAY Y-MP/8E с суммарной производительностью свыше 2 млрд. операций в секунду, сети ПЭВМ) открыли большие перспективы для резкого повышения качества и возможностей спектральных моделей волнения. Это позволило осуществить уникальные эксперименты с моделями и создать автоматизированные технологии диагноза и прогноза параметров ветрового волнения. Кроме того, применение суперЭВМ CRAY дало возможность существенно улучшить пространственное разрешение моделей, использовать более сложные и точные параметризации процессов подсеточного масштаба. Поэтому включение численных моделей волнения в автоматизированную систему оперативной обработки информации (АСОИИ) на ЭВМ CRAY (АСОИИ-CRAY), функционирующую в Гидрометцентре России, представляется важным этапом на пути их совершенствования и внедрения в оперативную практику.

В настоящее время в Гидрометцентре России реализованы и включены в банк задач АСОИИ-CRAY две модели: спектрально-параметрическая модель AARI-PD2 и модель «узконаправленного» приближения волнового спектра. Предварительно были проведены испытания этих моделей на диагностическом материале. Следует отметить, что испытание математических моделей расчета ветровых волн является довольно сложной задачей в связи с тем, что трудно бывает определить, какая часть погрешностей расчетов обусловлена недостатками самой модели, а какая часть связана с недостаточной точностью исходных полей ветра. Кроме того, источник ошибок расчетов волн может быть связан с недостаточно точным учетом волн зыби. Как известно зыбь может быть двух происхождений: зыбь, образовавшаяся в области шторма в результате ослабления скорости ветра, и зыбь, пришедшая в прогностическую точку от удаленных штормов. Складываясь, они образуют смешанное волнение. Но физический механизм такого наложения волн не всегда понятен. В практике расчетов смешанного волнения обычно рассчитывают отдельно высоту ветровых волн и отдельно волн зыби, а затем высота смешанного волнения получается путем их сложения по формуле

$$h_{св} = (h_{вв}^2 + h_{зыби}^2)^{1/2}$$

Полученная таким образом высота волны сравнивается с наблюдаемой высотой смешанного волнения.

В течение ряда лет в Санкт-Петербургском отделении Государственного океанографического института (СПО ГОИН) под руководством И.Н.Давидана разрабатывалась спектрально-параметрическая модель ветрового волнения. Затем она получила дальнейшее развитие в ААНИИ под руководством И.В.Лавренова. Модель обладает следующими особенностями.

Спектр волнения разделяется на две составляющие: ветровые волны и зыбь. Для ветровых волн уравнение баланса волновой энергии решается относительно нулевого момента спектра и генерального направления распространения волн. Зыбь рассчитывается на основе решения уравнения баланса волновой энергии с нулевой правой частью. Несмотря на существующие проблемы с точностью аппроксимации членов, входящих в правую часть уравнения баланса спектральной энергии волн, в модели применены численные схемы, позволяющие получить устойчивые и достаточно точные результаты. Одной из практических достижений модели состоит в том, что в ней заложена процедура для точного расчета распространения волн зыби, эволюция которых в современных моделях воспроизводится крайне неудовлетворительно. Положительный результат в этом отношении достигается благодаря применению полулагранжевой численной схемы, обеспечивающей высокую точность решения.

Проведенные испытания этой модели показали, что результаты расчетов не уступают, а в ряде случаев даже превосходят по точности зарубежные более продвинутое модели. В табл. 1 приведены основные статистические характеристики по срочным рядам высоты (Hs) и периода (Tz) волн, полученным по различным моделям и измерениям волн на буе NORDKAPP/ST, расположенном в Баренцевом море.

Таблица 1

Основные статистические характеристики по срочным рядам Hs и Tz, полученным по различным моделям

Модель	Параметр	Среднее	Медиана	Максимум	Арифм. ошибка	Среднеквадрат. отклонение	Дисперсия	Кэф. корр.
Buoy	Hs	2.598	2.319	9.987				
	Ts	6.059	5.960	10.807				
AARI-PD2	Hs	2.430	2.100	9.600	-0.167	0.799	0.638	0.831
	Tz	5.499	5.200	13.100	-0.560	1.257	1.581	0.740
WAM	Hs	2.176	1.900	9.400	-0.422	0.818	0.669	0.866
	Tz	7.092	6.900	13.800	1.033	1.399	1.959	0.853
WW3	Hs	1.976	1.700	7.400	-0.625	0.906	0.822	0.881
	Tz	6.280	6.100	12.000	0.220	0.917	0.842	0.833

Важным преимуществом этой модели по сравнению с другими является ее надежность и быстрое действие, что очень важно для оперативных целей. Время счета по модели AARI-PD2 занимает порядка 10 мин. Для сравнения достаточно сказать, что время счета по известным зарубежным моделям WAVEWATCH и WAM на порядок дольше – 33,5 и 15,5 ч соответственно. Кроме того, модель AARI-PD2 оказывается очень удобной для адаптации к различным акваториям морей и океанов, что позволяет ее быстро внедрять в морских прогностических центрах Росгидромета.

Данная модель была реализована как для глобального прогноза волнения, так и для регионального прогноза волнения, применительно к акваториям Норвежского, Гренландского и Баренцева морей. С начала 2001 г. технология глобального прогноза волнения была передана в Гидрометцентр России и включена в банк задач АСООИ-CRAY и с тех пор эксплуатируется в оперативном режиме. Регулярно, согласно сеансам АСООИ, выполняются оперативные прогнозы полей волнения по всему Мировому океану с сохранением результатов в циклической базе данных. Пример глобального прогноза ветрового волнения показан на рис. 1.

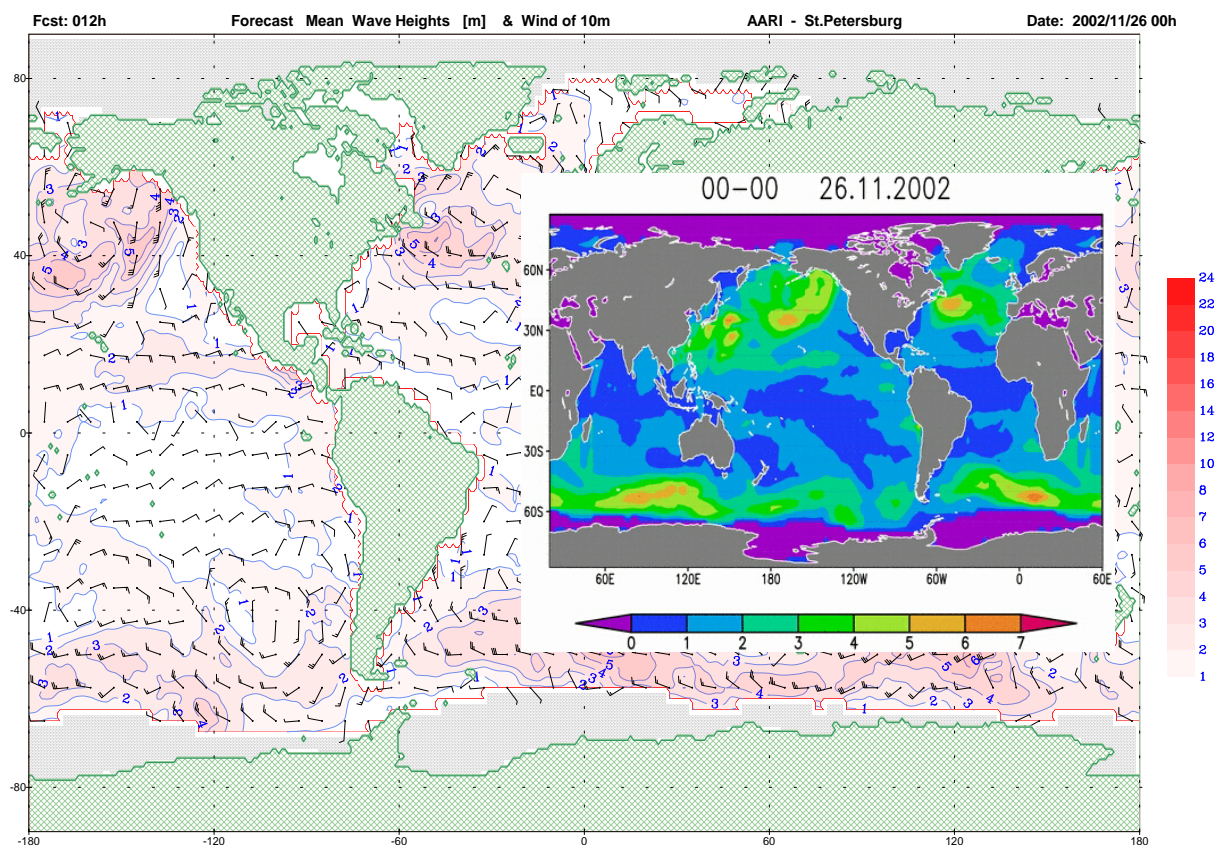


Рис. 1. Глобальный прогноз волнения на 00 ч СГВ 26 ноября 2002 г.

Входными данными являются поля давления, рассчитываемые по спектральной глобальной модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) класса T85L31, пересчитываемые в поля векторов ветра. В качестве выходных данных являются диагностические и прогностические поля значительной высоты, периода и направления ветровых волн и зыби на глобусе в сетке $2^{\circ},5 \times 2^{\circ},5$ с заблаговременностью 144 ч и выдачей результатов прогноза через 24 ч. Расчет ведется два раза в сутки по исходным срокам 00 и 12 ч СГВ. Обеспечен технологически доступ к результатам прогноза, хранящимся в базах данных АСООИ-CRAY, для удаленных пользователей, работающих с ПЭВМ в локальной вычислительной сети (ЛВС) CRAY.

С начала 2001 г. модель была передана в банк задач АСООИ-CRAY и находится в оперативной работе Гидрометцентра России. Регулярно, согласно сеансам АСООИ, выполняются оперативные прогнозы волнения с сохранением результатов в базе данных и на сайте Гидрометцентра России.

Другая модель, реализованная в Гидрометцентре России для прогноза ветровых волн, разработана группой специалистов института океанологии РАН (ИОРАН) и ГОИНа с участием специалистов Гидрометцентра России. Основой модели является теория «узконаправленного» приближения двумерного спектра ветровых волн, предложенная академиком РАН В.Е. Захаровым и развитая М.М.Заславским [10]. Эта модель качественно улучшает существующие в мире волновые модели 3-го поколения (например, модель WAM).

Достичь этого удалось за счет двух основных фундаментальных результатов: построенной В.Е.Захаровым процедуры упрощения общего интеграла нелинейных взаимодействий и предложенной М.М.Заславским техники самосогласованного описания взволнованной поверхности моря и ветрового потока над ней. Такой подход дает возможность динамически описывать состояние поверхности океана, в частности, эволюцию параметра шероховатости.

В течение последних лет велись активные работы по верификации этой модели, в результате которых она была существенно улучшена. В 1999 г. в Гидрометцентре России была проведена серия диагностических расчетов параметров волн для разнообразных ветроволновых ситуаций в Северной Атлантике. Результаты диагностических расчетов сопоставлялись с данными наблюдений, полученными с помощью автоматических стационарных буев, расположенных в западном и восточном секторах северной части Атлантического океана. (рис.2).

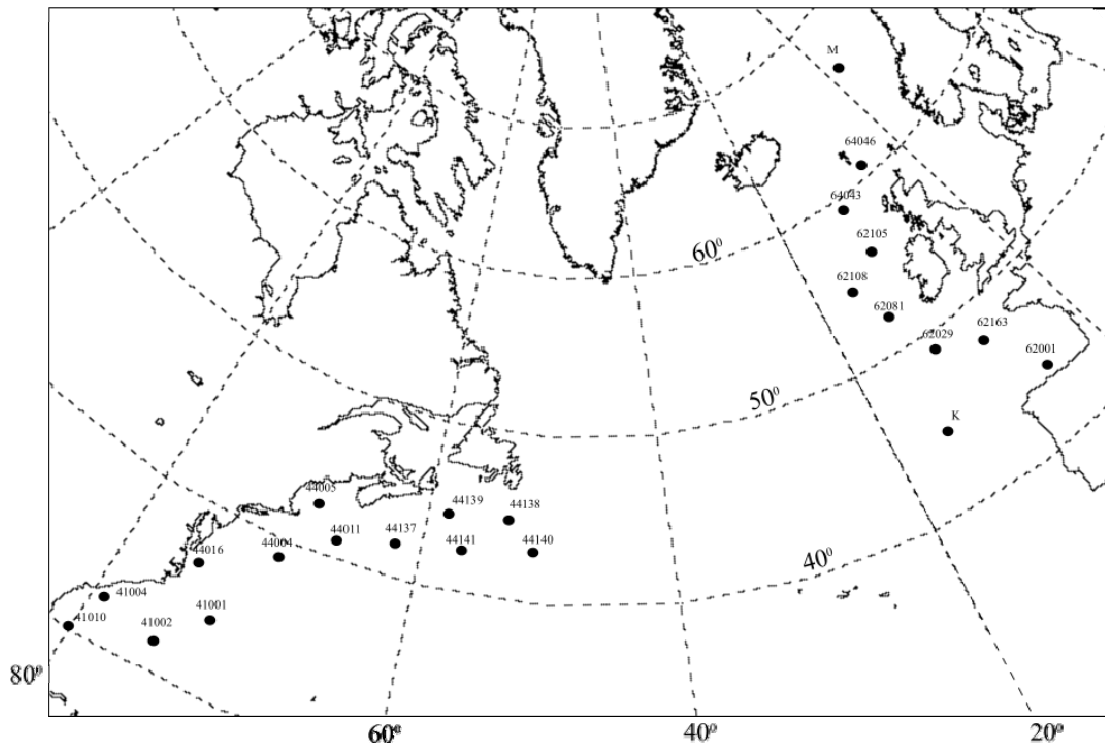


Рис. 2.Схема расположения автоматизированных стационарных буев в Северной Атлантике.

Результаты показали, что новая версия спектральной модели ветрового волнения позволяет получить достаточно надежные оценки высот волн в областях штормов, не уступающие по точности, а даже превышающие результаты расчетов по ранее разработанной интегрально-параметрической модели ветрового волнения, эксплуатируемой в Гидрометцентре России в системе АСОИИ с 1990 г. [2].

Кроме того, результаты диагностических расчетов по новой версии волновой модели были сопоставлены с результатами статистической верификации модели WAM, полученными в период с декабря 1987 г. по ноябрь 1988 г. для восточного побережья США и северо-восточной части Северной Атлантики (диагностические расчеты Замбези, 1989 г.), и показали преимущество новой модели перед моделью WAM (табл.2).

Результаты оценок диагностических расчетов высот волн по модели ИО РАН и ГОИН

Примечание. H_{ϕ} – средняя наблюдаемая высота волны, H_p – средняя расчетная высота волны, Δ – средняя абсолютная ошибка, S – средняя квадратическая ошибка, $Q(\%)$ – средняя относительная ошибка, S_i – параметр

Дата	Исходный срок	H_{ϕ}	H_p	Δ	S	$Q(\%)$	S_i	R
17.01.00	12	2,7	2,3	-0,4	0,64	22	20	0,95
18.01.00	00	3,2	2,8	-0,4	0,60	15	16	0,80
25.01.00	12	2,2	1,9	-0,3	0,59	27	25	0,88
26.01.00	00	2,4	2,2	-0,2	0,69	24	25	0,84
26.01.00	12	1,9	1,6	-0,3	0,64	31	30	0,97
27.01.00	00	1,6	1,4	-0,2	0,61	26	29	0,81
14.02.00	00	2,3	2,0	-0,3	0,59	16	18	0,98
18.04.00	12	2,3	2,1	-0,2	0,47	11	19	0,95
19.04.00	00	3,2	3,1	-0,2	0,44	16	13	0,97
20.04.00	12	3,1	3,0	-0,1	0,56	14	18	0,97
24.04.00	12	1,9	1,7	-0,2	0,52	20	24	0,87
26.04.00	12	2,1	1,9	-0,2	0,50	14	22	0,87
27.04.00	12	2,1	1,8	-0,3	0,52	16	24	0,82
09.05.00	12	1,3	1,3	0,0	0,24	13	18	0,96
Среднее		2,3	2,1	-0,24	0,54	19	22	0,90
Статистич. оценки по модели WAM	Восточ. побережье США			-0,38	0,66		37	0,83
	Северо-восточ. Атлантика			-0,40	0,82		29	0,85

разброса, R – коэффициент корреляции.

Результаты диагностических расчетов дали основание для проведения испытаний новой версии модели ветрового волнения по прогностическим полям ветра с целью дальнейшего внедрения ее в оперативную практику. Входными данными для выполнения расчетов параметров волн являлись поля объективного анализа (ОА) приземного атмосферного давления, получаемые по методике А.Н.Багрова, и полусферные прогностические поля давления, получаемые по спектральной модели атмосферы T40L15 и накапливаемые в банке данных «ПРОГНОЗ» на ЭВМ CRAY. Эти поля затем пересчитывались в поля векторов ветра. Выходными данными являются средние высоты волн и направление их распространения с дискретностью 12 ч с 3-суточной заблаговременностью.

Результаты прогнозов сопоставлялись с данными буев, положение которых показано на рис. 2. В расчет были приняты данные наблюдений на 21 бую и 2 кораблях погоды «Майкл» и «Кило». Данные с заякоренных буев и кораблей погоды собираются с помощью геостационарных метеорологических спутников и затем распространяются в виде сводок по Глобальной системе телесвязи (ГСТ) в международном коде SHIP.

Акватория, для которой проводились диагностические и прогностические расчеты охватывает Северную Атлантику от 20° с.ш. до 80° с.ш. на сетке состоящей из 897 узлов (23x39). Горизонтальный шаг разрешения составляет 2,5°.

В 2002 г. модель была реализована в Гидрометцентре России и включена в банк оперативных задач ASCOII-CRAY как экспериментальная технология прогноза высоты и направления распространения волн. Обобщенные результаты оценок прогнозов высот волн в Северной Атлантике показаны в табл. 3.

Обобщенные результаты оценок прогнозов высот волн в Северной Атлантике

Заблаговременность прогноза	Количество прогнозов	Средняя абсолют. ошибка (м)	Средняя относит. ошибка (%)	Средняя квадратическая ошибка (S)	Оправданность (%)	Индекс разброса S_i
1-е сут	259	-0,41	25	0,90	79	33
2-е сут	237	-0,29	25	0,98	72	34
3-и сут	246	-0,47	28	1,04	70	36

В результате испытания метода прогноза высоты волн выявилась систематическая ошибка превышения наблюдаемой высоты волны над прогнозируемой. При прогнозе на 1-е сут среднее превышение составляет - 0,41 м, на 2-е сут – 0,29 м и на 3-и сут -0,47 м. Анализ показал, что эти превышения связаны с недоучетом составляющей ветровой зыби, возникающей при ослаблении скорости ветра в шторме или зыби, пришедшей в расчетную точку от удаленных штормов, что было отмечено выше. Другие источники ошибок прогноза высоты волн связаны с ошибками в расчетах прогностических полей давления и полей ветра, которые в свою очередь, по-видимому, связаны с недостаточным пространственно-временным разрешением расчетной сетки атмосферной модели.

В целом результаты испытания модели на прогностическом материале оказались вполне приемлемыми и были представлены на ЦМКП Росгидромета, которая своим решением от 5 ноября 2001 г. рекомендовала Гидрометцентру России внедрить метод в качестве основного метода краткосрочного прогноза высот и направления распространения волн в Северной Атлантике, включить в автоматизированную систему АСОИИ-CRAY и провести его опытную эксплуатацию. К сожалению, имеются технологические недоработки, которые пока не устранены. Например, результаты прогноза представляются только в форме таблиц, которые трудно поддаются интерпретации. Кроме того, данная технология не обладает быстродействием. Прогноз волнения на 3 сут для Северной Атлантики на ЭВМ CRAY занимает более 8 ч, что, безусловно, снижает его оперативность.

В заключение следует сказать, что успешность прогнозов волнения, рассчитываемых по выше описанным технологиям, в значительной степени зависит от исходных полей ветра и начального поля волн, которое получается путем диагностического расчета. В настоящее время данные натурных измерений параметров волн этими моделями не усваиваются. Вместе с тем, усвоение натурных данных о волнении в моделях ветрового волнения могло бы привести к улучшению качества прогнозов распределения высот волн. Для этого необходимо выполнять ОА полей волнения, который важен не только в качестве исходной информации для прогноза, но также для верификации моделей и оценки качества самих прогнозов. В последние годы в развитых странах (США, Франция, Япония, Австралия и др.) ведутся активные работы в этом направлении. Необходимо эти работы активизировать и в России. Для этого в настоящее время существует достаточно обширная сеть наблюдений за волнением, включающая спутниковую альтиметрию, автоматизированные стационарные и дрейфующие буи, суда добровольных наблюдений и т.д. Все эти данные доступны по каналам ГСТ. Усвоение этих данных может привести к улучшению качества волновых моделей, а следовательно, и прогнозов волнения.

Список литературы

1. Абузяров З.К. Морское волнение и его прогнозирование // Л.: Гидрометеиздат.- 1981.- 166 с.
2. Абузяров З.К., Матушевский Г.В., Кабатченко И.М. Прогноз волнения в океане на основе параметрической интегральной модели. //Труды Гидрометцентра СССР.- 1991.-

Вып.314.- С.60-68.

3. 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.

4. Заславский М.М., Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резник М.В. Моделирование ветра и волн при вторичных циклонах на Черном море.// Метеорология и гидрология.- 2001.- № 5.

5. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. - С. Петербург.- Гидрометеиздат, 1998, 499с.

6. Руководство по морским гидрологическим прогнозам // СПб.: Гидрометеиздат.- 1994.- 525 с.

7. Ocean wave modeling (SWAMP group). //New York: Plenum press.- 1985.- P. 256.

8. The WAM model -a third generation ocean wave prediction model. //J.Phys.Oceanogr.- 1988.- № 12.- P.1775-1810.

9. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18, Hendrik L. Tolman.- 1999.- P.110 .

10. Zaharov V.E., Zaslavskii M.M., Kabatchenko I.M., Matushevskii G.V., Polnikov V.G. Conceptually new wind-wave model. // Proc. Of Air-Sea Interface Symposium.- 11-15 January 1999.- Sydney.- Australia.