

УДК 551.465 (262.5)

С.А. Мысленков¹, В.С. Архипкин², К.П. Колтерманн³

ОЦЕНКА ВЫСОТЫ ВОЛН ЗЫБИ В БАРЕНЦЕВОМ И БЕЛОМ МОРЯХ

Представлена реализация спектральной волновой модели SWAN для Баренцева и Белого морей, включающая северную часть Атлантического океана. Использована оригинальная нерегулярная вычислительная сетка, где в Атлантическом океане шаг составляет 1° , в Баренцевом море – $0,5^\circ$ и в Белом море – $0,2^\circ$. В качестве входных данных о ветре для расчетов использовались данные реанализа NCEP CFSR с высоким разрешением $\sim 0,3^\circ$.

На основании результатов численных экспериментов оценено влияние зыби, генерируемой в Северной Атлантике либо в Баренцевом море, на акваторию Белого моря, что позволит решить проблему открытых границ при моделировании в нем ветрового волнения.

Проведено три численных эксперимента с искусственным отключением поля ветра над акваториями Белого и Баренцева морей для выделения непосредственно влияния зыби, генерируемой в Северной Атлантике. Выявлено, что влияние зыби из Северной Атлантики, приходящей на акваторию Белого моря, незначительно (0,25 м), тогда как для Баренцева моря высота зыби составляет >5 м. Высота волн зыби, приходящей из Баренцева моря в Белое, составляет около 1 м. Полученные результаты позволяют оценить возможные погрешности при моделировании волнения в Белом и Баренцевом морях без учета волн, приходящих из Северной Атлантики, и при наличии открытых границ.

Сопоставление результатов нашего моделирования с данными спутниковой альтиметрии и моделью WaveWatch 3 показало, что в целом обе модели воспроизводят близкую к реальности высоту волн. По сравнению со спутниковыми данными модели завышают высоту волн на 2–3 м, но это можно объяснить осреднением спутниковых данных, в которых поле волнения сглажено.

Показано, что во время штормов с высотой волн >6 –7 м из Северной Атлантики распространяется зыбь с периодом 15–16 с, а к центру Баренцева моря пиковый период смещается к 18 с, т.е. период зыби закономерно увеличивается при удалении от места генерации, и модель работает корректно.

Ключевые слова: моделирование волнения, зыбь, SWAN, распространение зыби, Баренцево море, Белое море.

Введение. Изучение гидрометеорологических условий в арктических морях России – приоритетная задача в связи с активным освоением шельфовых месторождений нефти и газа. Знание параметров ветрового волнения необходимо при проектировании и строительстве объектов в прибрежной зоне, а также для безопасности судоходства. Одна из задач лаборатории комплексных эколого-географических исследований Арктики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова – изучение режима ветрового волнения и анализ экстремальных штормов в Белом и Баренцевом морях.

Для исследования изменчивости ветрового волнения в арктических морях широко применяют различные математические модели [Дианский и др., 2014; Дымов и др., 2004; Зеленко и др., 2004; Кабатченко и др., 2004; Режим..., 2013; Справочные..., 2003; Gusdal et al., 2009; Reistad et al., 2011; Tolman et al., 2002]. В настоящее время в Гидрометцентре России в оперативном режиме работает система прогноза волнения в арктических морях. Прогноз волнения в Баренцевом море производится при по-

мощи модели WaveWatch3. Модель использует прогностические поля ветра GFS (Global Forecast System) и работает в рамках единой технологии для акватории Мировой океан – Арктический бассейн. Расчетная сетка для Мирового океана с разрешением $0,5^\circ$ сопряжена с сеткой Арктического бассейна, имеющей разрешение ~ 10 км. Проверка качества модели осуществлялась на основе спутниковых данных, результаты испытаний признаны удовлетворительными [Зеленко и др., 2014].

Среди отечественных работ, посвященных моделированию волнения в Баренцевом море, отметим работу [Справочные..., 2003], где модель SWAN (Simulating Wave Nearshore) использована для составления морского регистра; оценки показали хорошее совпадение с данными наблюдений.

Расчеты и прогнозы ветрового волнения также осуществляются с использованием спектрально-параметрической модели ААНИИ (PD2-AARI). Модель неоднократно верифицировалась по данным инструментальных наблюдений на разных акваториях и сопоставлялась с такими известными моделя-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с.; e-mail: stasocean@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория комплексных эколого-географических исследований Арктики, профессор, доктор. геогр. н.; e-mail: peter.koltermann@gmail.com

ми, как WAM (WAve prediction model) и WaveWatch3. Результаты статистических оценок точности расчетов и прогнозов для всех моделей примерно одинаковы (среднеквадратическая ошибка составляет ~0,5 м, коэффициент корреляции между наблюдаемыми и расчетными значениями — ~0,9 [Дымов и др., 2004; Режим..., 2013]).

Качество волновых моделей во многом зависит от используемых входных данных о поле ветра. Так, в работе [Дианский и др., 2014] расчет поля ветра выполнен по модели WRF (Weather Research and Forecasting), а параметры волнения для Карского и Печорского морей моделируются при помощи Российской атмосферно-волновой модели [Кабатченко и др., 2004]. Оценки точности расчетов скорости ветра при сравнении с данными метеостанций показали корреляцию 0,8–0,9, и, возможно, именно использование мезомасштабных атмосферных моделей в будущем позволит улучшить диагноз и прогноз ветрового волнения.

Моделирование волнения в Белом и Баренцевом морях связано с проблемой выбора границ расчетной области. Формально для корректного воспроизведения волн в Белом и Баренцевом морях необходимо включать в расчетную область весь Атлантический океан, так как для приходящих из него волн нет серьезных препятствий для распространения. Большинство прогностических и диагностических моделей для Баренцева моря ограничивают область моделирования меридианом 0°, либо 60° с.ш. в Северной Атлантике, либо используют несколько вложенных сеток с разным шагом. Для Белого моря область моделирования включала либо небольшой сектор Баренцева моря, либо все море. При включении в область моделирования больших акваторий с высоким пространственным разрешением возникает проблема с вычислительной мощностью. Поэтому выбор области моделирования и расположения открытых границ — одна из важных задач при моделировании ветрового волнения.

Цель работы — оценка влияния зыби, генерируемой в Северной Атлантике либо в Баренцевом море на акваторию Белого моря, что позволит решить проблему выбора открытых границ при моделировании в нем ветрового волнения.

Для достижения поставленной цели проводились численные эксперименты по расчету ветрового волнения и зыби в области от Северной Атлантики до Белого моря при искусственном отключении ветра на той или иной части этой акватории.

Материалы и методы исследований. Для решения поставленной задачи выбрана спектральная волновая модель третьего поколения SWAN ver. 41.01, так как она создана специально для расчетов параметров ветрового волнения в прибрежной зоне по заданным полям ветра и течений, а также рельефу дна [SWAN..., 2007]. Эту модель разрабатывает и свободно распространяет Дельфтский технологический университет. В то же время, как показывает сравнение результатов численных расчетов,

выполненных по этой модели, с результатами расчетов по другим моделям (WAM и WATCH III), модель SWAN не уступает по качеству расчетов и на глубокой воде в открытом море [Gusdal et al., 2010]. Эту модель уже использовали для моделирования волнения в Баренцевом море и Атлантическом океане, оценки качества моделирования высоты волн присутствуют в работах [Справочные..., 2003; Gusdal et al., 2010].

В модели SWAN могут быть реализованы следующие процессы, связанные с распространением волн: распространение волн в пространстве; рефракция и дифракция волн; генерация ветром; диссипация из-за «забурунивания» (whitcapping); диссипация из-за обрушения волн, вызванного изменением глубины; диссипация при трении о дно; нелинейное взаимодействие волн как в глубоком (quadruplets), так и в мелком море (triads) [SWAN..., 2007]. Модель позволяет рассчитывать следующие параметры волн: высоту значительных волн (соответствует 13%-ной обеспеченности), направление, период и длину волн, высоту зыби, перенос волновой энергии, плотность спектральной энергии и др. Авторы уделяли особое внимание высоте значительных волн (включающих и ветровые волны, и зыбь) и отдельно высоте зыби. Выходная информация из модели организована для четырех точек, расположенных последовательно от Северной Атлантики до Белого моря (рис. 1). Дискретность вывода данных 30 мин. Модель SWAN спектральная, в результате получаемые на выходе параметры волн в той или иной степени представляют собой итог интегрирования направленного частотного спектра, поэтому в работе также проанализированы рассчитанные спектры энергии волн.

В качестве входных полей ветра для диагностических расчетов использованы данные реанализа высокого разрешения NCEP CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (1979–2010) [CISL..., 2015]. Этот реанализ выбран по той причине, что он обладает высоким пространственным (~0,3°) и временным разрешением (1 ч), а сравнение данных о скорости и направлении ветра реанализов CFSR, MErra, JRA, Era-Interim с данными метеостанций в Арктическом бассейне показало, что реанализ CFSR имеет минимальную ошибку и хорошую корреляцию с данными наблюдений [Lindsay et al., 2014].

Для оценки качества волновой модели SWAN использованы данные спутниковой альтиметрии, распространяемые Центром данных спутниковой альтиметрии (Франция, Тулуза) [Aviso..., 2015]. С этого ресурса были загружены данные о высоте значительных волн на регулярной сетке с шагом 1° и с временной дискретностью 24 ч. Этот продукт получается путем осреднения по времени и пространству данных с разных спутников. Также существует возможность использовать данные альтиметрии вдоль треков пролета спутников (без осреднения), однако эти данные отличаются нерегулярностью в

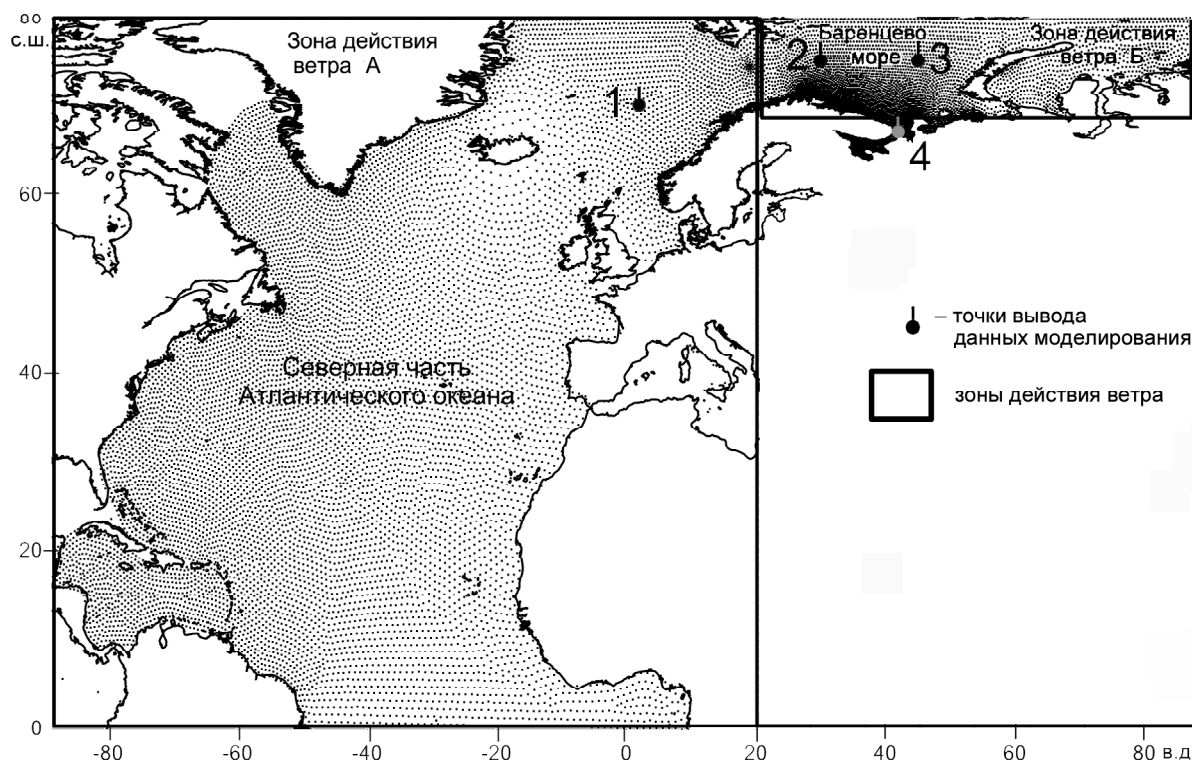


Рис. 1. Расчетная сетка. Точки вывода данных модели (с.ш./в.д.): 1 – 2.0/70.0; 2 – 30.0/75.0; 3 – 45.0/75.0; 4 – 42.0/67.0

пространстве и времени и малопригодны для сравнительного анализа в конкретной точке. Качество данных альтиметрии для арктического региона невысокое [Janssen et al., 2009], однако для нашей задачи было необходимо только качественное сравнение, чтобы показать, что модель правильно воспроизводит фазу наступления шторма и схожие значения высоты волн.

Привлекались также данные волнового реанализа NOAA с пространственным разрешением $1,25^\circ$ на 1° , основанного на модели WaveWatch 3 и данных о ветре из реанализа CFSR с разрешением $0,5^\circ$ [NOAA..., 2015; Tolman, 2002]. Использованы ряды высоты значительных волн с дискретностью во времени 3 ч.

При моделировании ветрового волнения использована оригинальная нерегулярная вычислительная сетка. Ее шаг в Атлантическом океане составляет 1° , в Баренцевом – $0,5^\circ$ и в Белом море – $0,2^\circ$. Общее число узлов 15 000 (рис. 1).

Для оценки влияния зыби, генерируемой непосредственно в Северной Атлантике, проведено три численных эксперимента с искусственным отключением поля ветра над акваториями Белого и Баренцева морей. В первом эксперименте ветер задавали в зоне А на акватории всей Северной Атлантики до 20° в.д. (рис. 1). Таким образом, на акватории Белого и Баренцева морей локальный ветер отсутствовал и все наблюдаемое здесь волнение могло приходить только из Северной Атлантики.

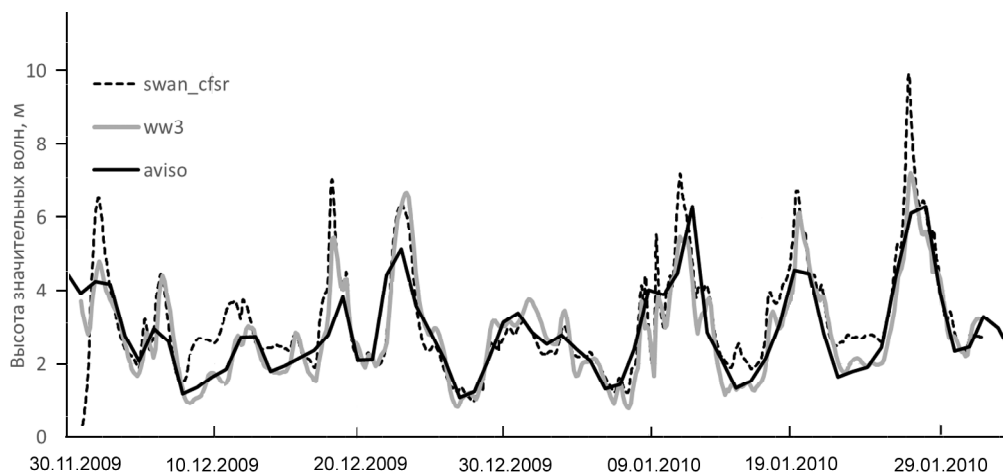


Рис. 2. Высота значительных волн с 01.12.2009 по 31.01.2010 в точке с координатами 74° с.ш., 34° в.д. по спутниковым данным (aviso), по результатам модели WaveWatch3 (ww3) и по модели SWAN (swan_cfsr)

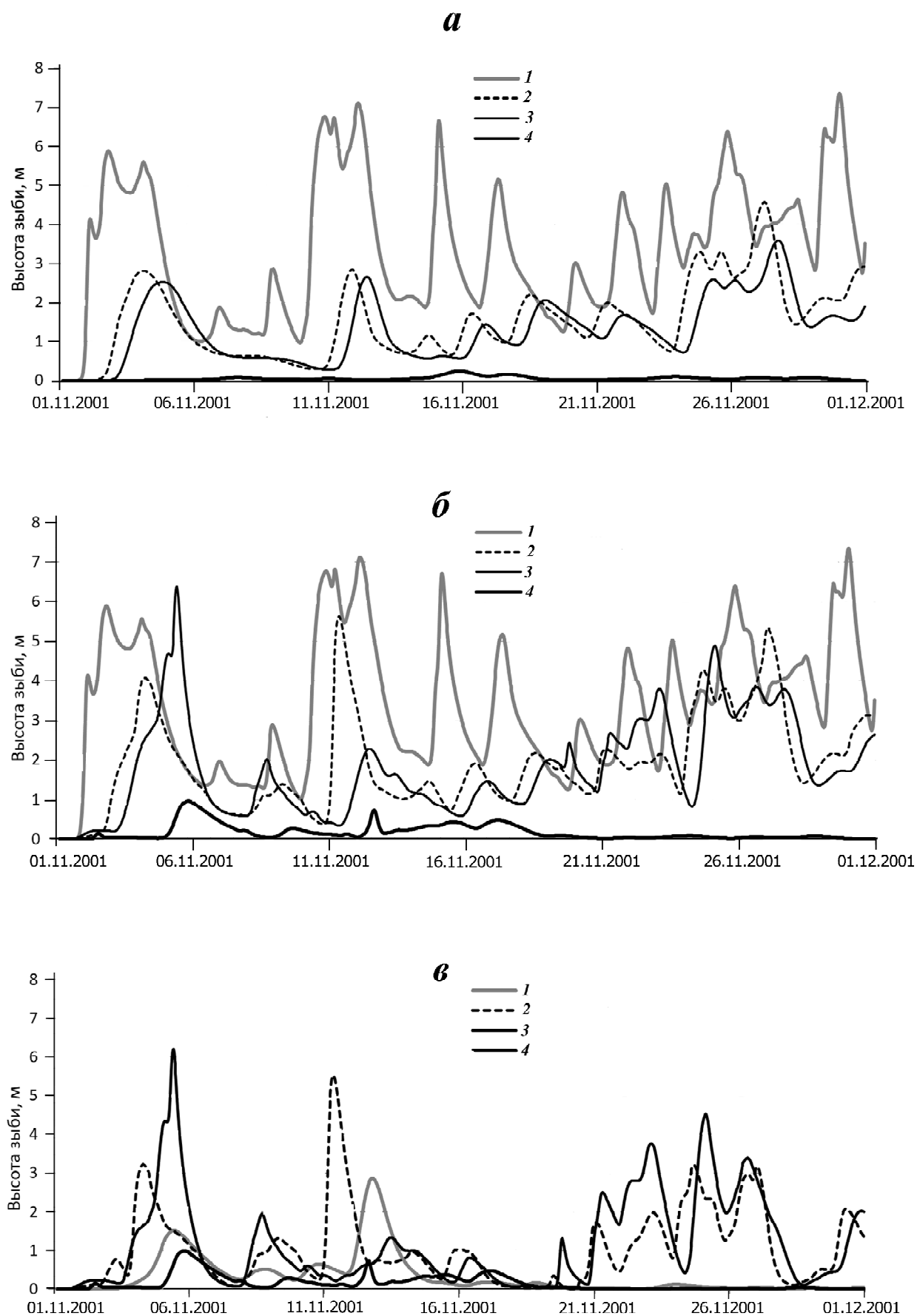


Рис. 3. Результат моделирования высоты волн зыби в ноябре 2001 г.: *а* – ветер задавали в зоне А, *б* – ветер задавали в зонах А и Б, *в* – ветер задавали только в зоне Б; 1 – Северная Атлантика; 2, 3 – Баренцево море; 4 – Белое море

Во втором эксперименте ветер задавался на всей области моделирования в зонах А и Б (зона Б охватывает Баренцево море).

В третьем эксперименте ветер задавали только в зоне Б от 20° до 75° в.д. Отсюда следует, что волны в Атлантическом океане не формируются, поэтому можно наблюдать генерацию и распространение волн только из Баренцева моря.

Результаты исследований и их обсуждение.

Перед численными экспериментами по оценке влияния зыби было выполнено сравнение высоты значительных волн (волны 13%-ной обеспеченности) по результатам выполненной нами реализации с данными спутниковой альтиметрии и моделью NOAA WaveWatch 3 (рис. 2). Спутниковые данные о высоте волн – практически единственный источник данных для Баренцева моря, чтобы оценить качество волновых моделей, поскольку прямые инструментальные наблюдения за волнением в открытом море выполняются редко и недоступны для научной работы, так как они являются коммерческими. При сравнении со спутниковыми данными обе модели показывают высокую корреляцию, однако завышают высоту волн на 2–3 м. Это можно объяснить использованием осредненных спутниковых данных, которые представляют сглаженное поле волнения. Результаты, полученные по обоим моделям, различаются мало, что связано с использованием в обоих случаях данных реанализа CFSR. В то же время использование разных волновых моделей и разной вычислительной сетки предполагает некоторое расхождение. Из-за недостаточной длины ряда сравнение не позволяет получить количественную оценку точности моделей и приводится с целью показать на качественном уровне, что выполняемая нами реализация воспроизводит схожую со спутниковой высоту волн и согласуется с резуль-

татами волнового анализа NOAA, оценка качества которого приводится в работе [Tolman, 2002].

На рис. 3 представлена высота волн зыби для трех экспериментов при включении поля ветра в разных зонах исследуемого района для разных точек по результатам моделирования. Зыбь в районе точки 1 либо формируется в этом районе, либо приходит из других частей Северной Атлантики. Зыбь в точки 2 и 3, находящиеся в Баренцевом море, при отсутствии ветра в зоне Б приходит только из Северной Атлантики. При наличии ветра в зонах А и Б высота зыби в районе этих точек представляет собой сумму высот зыби, приходящей из Северной Атлантики, и зыби, формируемой непосредственно в этом районе. Во всех экспериментах ветер над Белым морем не задавали, поэтому зыбь в горло Белого моря (точка 4) могла приходить только со стороны Баренцева моря.

Рассмотрим сначала случай, когда ветер задавали только в Северной Атлантике (зона А на рис. 1), и соответствующие результаты на рис. 3,а. За период моделирования в точке 1 наблюдалось несколько случаев, когда высота зыби превышала 5–6 м. Так как ветер в зоне Б отсутствовал, то в точки 2, 3, 4 зыбь могла прийти только из Северной Атлантики. Как видно на рис. 3,а, высота зыби в точках 2 и 3 может достигать 3–4 м и приблизительно в 2 раза меньше, чем в точке 1. Также можно наблюдать сдвиг по фазе колебаний, что связано со скоростью распространения зыби и расстоянием между точками. В горле Белого моря (точка 4) максимальная высота зыби не превышает 0,25 м, что позволяет утверждать, что волны из Северной Атлантики влияют на этот район незначительно.

В том случае, когда ветер задавали в зонах А и Б (рис. 3,б), в точках 2, 3 и 4 высота зыби в нескольких случаях существенно возросла. Это связано

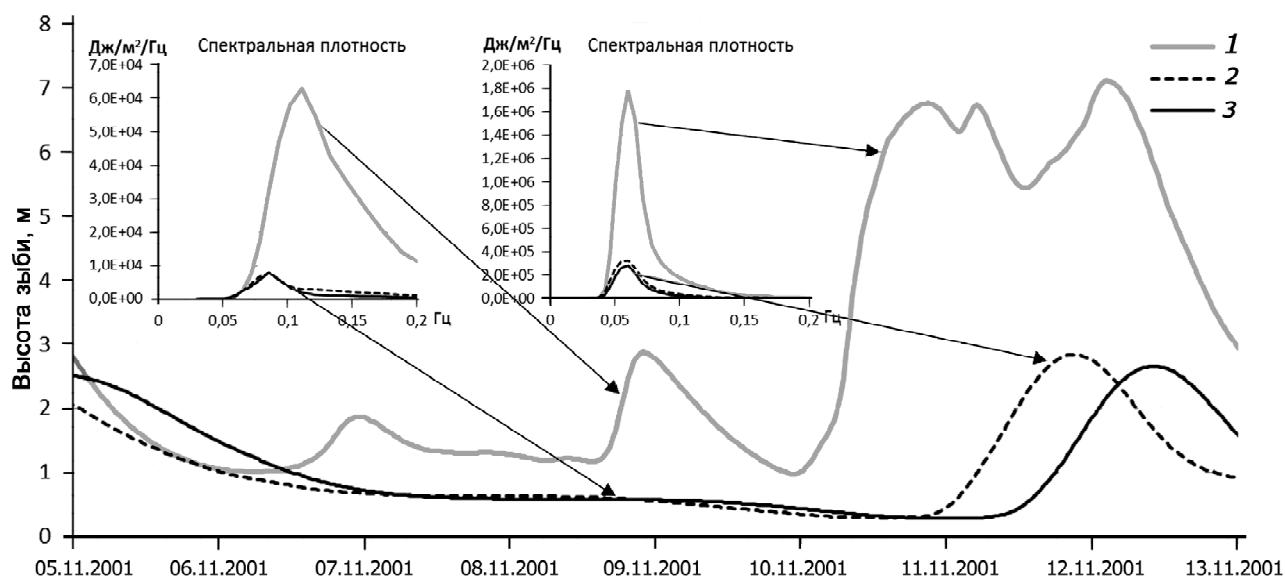


Рис. 4. Высота волн зыби и спектральная плотность для точек 1, 2, 3 на пике шторма 11–12.11.2001 и для 08.11.2001 Стрелки указывают момент времени и высоту зыби, которым соответствует график спектральной плотности; 1 – Северная Атлантика; 2, 3 – Баренцево море

с совокупным действием волн из Северной Атлантики и генерацией зыби непосредственно в Баренцевом море. В ряде случаев высота зыби в точках 2 и 3 составляет 5–6 м и сопоставима с высотой в точке 1. В горле Белого моря (точка 4) максимальная высота зыби составляла до 1 м, следовательно, волны, генерируемые в Баренцевом море, распространяются до горла Белого моря.

На рис. 3, в представлен вариант, когда ветер задавали только в зоне Б – на акватории Баренцева моря. Отметим, что высота зыби в точке 1 не превышает 3 м, а в некоторых случаях отсутствует. Следовательно, волны из Баренцева моря могут распространяться в Северную Атлантику, однако направление волн обусловлено локальными ветровыми условиями.

Характеристики зыби меняются по мере распространения из района шторма. Например, плотность энергии волн уменьшается за счет геометрического расхождения. В связи с тем, что диссипативные процессы (разрушение волн, сопротивление ветра, турбулентное трение) влияют на короткие волны сильнее, чем на длинные, форма спектра меняется, и его пик смещается в сторону низких частот. Этот процесс показан на рис. 4, где приведены графики спектральной плотности для точек 1, 2, 3 на пике шторма 11–12 ноября (для каждой точки время прихода максимальной зыби отличается) и в относительно спокойный день (8 ноября). Во время шторма 11 ноября высота зыби в точке 1 превышала 6 м, пик энергии спектра приходится на частоту 0,06 Гц, что соответствует периоду 16,5 с, тогда как в точках 2 и 3 в Баренцевом море энергия спектра уже на порядок меньше, высота зыби не более 3 м, а пиковый период смещается к 18 с. Энергия спектра 8 ноября на 2 порядка меньше, чем во время шторма, и спектр для точки 1 более широкий и включает в себя периоды от 5 до 15 с. Пиковый период для точ-

ки 1 составляет 9 с, а для точек 2 и 3 – 12 с. Смещение пика спектра в низкие частоты свидетельствует о том, что короткие волны с периодом <10 с практически не приходят из Северной Атлантики в Баренцево море. Согласно работе [Ponce de Leyn, Guedes Soares, 2012] пиковый период в Баренцевом море для ноября–декабря 1991 г. составлял в среднем 14–15 с, а во время сильных штормов – 18–20 с, что полностью согласуется с нашими расчетами.

Выводы:

– в результате численных экспериментов выявлено, что высота зыби, приходящей из Северной Атлантики в Баренцево море, может достигать 5 м. Для акватории Белого моря влияние зыби из Северной Атлантики незначительно (0,2 м). При генерации волн непосредственно в Баренцевом море зыбь высотой до 1 м приходит в Белое море. Этот результат важен прежде всего для моделирования волнения в Белом и Баренцевом морях, поскольку позволяет объективно выбирать внешние границы области, т.е. для корректного воспроизведения волн в Белом море достаточно учитывать только акваторию Баренцева моря;

– сопоставление результатов нашего моделирования с данными спутниковой альтиметрии и моделью WaveWatch 3 показало, что в целом обе модели воспроизводят близкую к реальности высоту волн. По сравнению со спутниковыми данными модели завышают высоту волн на 2–3 м, но это можно объяснить осреднением спутниковых данных, в которых поле волнения сглажено;

– показано, что во время штормов с высотой волн >6–7 м из Северной Атлантики распространяется зыбь с периодом 15–16 с, а к центру Баренцева моря пиковый период смещается к 18 с, т.е. период зыби закономерно увеличивается при удалении от места генерации и модель работает корректно.

Благодарности. Разработка методики исследования параметров волнения выполнена В.С. Архипкиным и К.П. Колтерманном за счет гранта РНФ (проект № 14-37-00038). Расчеты параметров ветрового волнения в Белом и Баренцевом море выполнены С.А. Мысленковым за счет гранта РФФИ (проект № 14-05-91769).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М. и др. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1 (13). С. 57–73.

Дымов В.И., Пасечник Т.А., Лавренов И.В. и др. Сопоставление результатов расчетов по современным моделям ветрового волнения с данными натурных измерений // Метеорология и гидрология. 2004. № 7. С. 87–94.

Зеленко А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в мировом океане и морях России // Тр. Гос. океанографического ин-та. 2014. Т. 215. С. 90–101.

Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резников М.В., Заславский М.М. Моделирование ветра и волн при вторичных цик-

лонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 61–71.

Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях: Науч.-метод. пособие / Под ред. Е.С. Нестерова. М.: Исслед. группа «Социальные науки», 2013. 295 с.

Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. 213 с.

Aviso Satellite data. URL: <http://www.avisio.oceanobs.com> (дата обращения: 12.03.2015).

CISL Research Data Archive. URL: <http://rda.ucar.edu> (дата обращения: 12.01.2015).

Gusdal Y., Carrasco A., Furevik B.R., et al. Validation of the operational wave model WAM and SWAN // Oceanography. 2009. Rep. Vol. 18. 2010. 28 p.

Janssen P., Abdalla S., Hersbsch H., Bidlot J.-R. Error estimation of buoy, satellite, and model wave height data // *J. Atmosphere and Oceanic Technology*. 2006. Vol. 24, iss. 9, pp. 1665–1677.

Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic // *J. Climate*. 2014. Vol. 27, pp. 2588–2606.

NOAA Wave Watch 3. URL: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves> (дата обращения: 18.04.2015).

Ponce de Leyn S., Guedes Soares C. Distribution of winter wave spectral peaks in the seas around Norway // *Ocean Engineering*. 2012. Vol. 50. P. 63.

Reistad M., Breivik O., Haakenstad H. et al. A high-resolution hindcast of wind and waves for the North Sea, the Norwegian Sea and the Barents Sea // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. C05019.

SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III ver. 40.51A // University of Technology, Delft, Netherlands, 2007. Vol. 98.

Tolman H.L. Testing of WAVEWATCH III Version 2.22 in NCEP's NWW3 Ocean Wave Model Suite // NOAA/NWS/NCEP/OMB Techn. Note. 2002. Vol. 214. 99 p.

Поступила в редакцию 09.06.2015
Принята к публикации 11.09.2015

S.A. Myslenkov¹, V.S. Arkhipkin², K.P. Koltermann³

ESTIMATION OF THE HEIGHT OF SWELL IN THE WHITE AND BARENTS SEAS

The SWAN spectral wave model was realized for the White and Barents seas, as well as for the northern part of the Atlantic. A new irregular grid was used for calculation with 1° interval for the Atlantic, 0.5° for the Barents Sea and 0.2° for the White Sea. The input wind data were the NCEP CFSR reanalysis data of high resolution (about 0.3°). The results of numerical experiments made it possible to estimate the influence of swell originating from the Northern Atlantic on the White and Barents seas, thus contributing to the solution of the problem of open boundaries while simulating wave processes in the seas. In the process of three numerical experiments the wind field over the White and Barents seas was «switched off» in order to isolate the influence of swell originating from the Northern Atlantic. The impact doesn't exceed 0.25 m within the White Sea, while it is above 5 m for the Barents Sea. The height of swell coming from the Barents Sea into the White Sea is about 1 m. The results provide for the estimation of possible errors in the process of wave simulation for the White and Barents seas under the situation of open boundaries and in the absence of waves coming from the Northern Atlantic.

The accuracy of simulation was verified by comparing the results with remote sensing data about wave heights. Correlation of results with the data of satellite altimetry and the WaveWatch3 model showed that in general both models simulate near-real wave heights. The simulated wave height values are 2–3 m above the satellite data, mainly because the averaged remote sensing data represent a largely smoothed wave field. During storms with the waves higher than 6–7 m the swell from the Northern Atlantic has the period of 15–16 s and to the central part of the Barents Sea the peak period changes for 18 s.

Keywords: Barents Sea, White Sea, simulation of waves, swell, SWAN model, swell propagation.

Acknowledgement. The procedure of wave parameters study was elaborated by V.S. Arkhipkin and K.P. Koltermann under financial support of the Russian Science Foundation (project 14-37-00038). Parameters of wind waves in White and Barents seas were calculated by S.A. Myslenkov under financial support of the RFBR (grant No 14-05-91769).

REFERENCES

Aviso Satellite data. URL: <http://www.aviso.oceanobs.com> (Accessed: 12.03.2015).

CISL Research Data Archive. URL: <http://rda.ucar.edu> (Accessed: 12.01.2015).

Dianskij N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M. i dr. Vosproizvedenie cirkulacii Karskogo i Pechorskogo morej s pomoshh'ju sistemy operativnogo diagnoza i prognoza morskoy dinamiki [Simulation of circulation of the Kara and Pechora Seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics], *Arktika: jekologija i jekonomika*. 2014, no 1 (13), pp. 57–73 (in Russian).

Dymov V.I., Pasechnik T.A., Lavrenov I.V. i dr. Sopostavlenie rezul'tatov raschetov po sovremennym modeljam vetrovogo volnenija s dannymi naturnyh izmerenij [Comparison of modern

wind-wave model results with field measurements], *Meteorologija i gidrologija*. 2004, no 7, pp. 87–94 (in Russian).

Gusdal Y., Carrasco A., Furevik B.R. et al. Validation of the operational wave model WAM and SWAN // *Oceanography*. 2009. Rep. Vol. 18. 2010. 28 p.

Janssen P., Abdalla S., Hersbsch H., Bidlot J.-R. Error estimation of buoy, satellite, and model wave height data // *J. Atmosphere and Oceanic Technology*. 2006. Vol. 24, iss. 9, pp. 1665–1677.

Kabatchenko I.M., Matushevskij G.V., Reznikov M.V., Zaslavskij M.M. Modelirovanie vetra i voln pri vtorichnyh termicheskikh ciklonah na Chernom more [Numerical modeling of wind and waves in a secondary cyclone at the Black sea], *Meteorologija i gidrologija*, 2001, no 5, pp. 61–71 (in Russian).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Research Scientist; e-mail: stasocean@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Complex Environmental-Geographic Investigation of the Arctic, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: peter.koltermann@gmail.com

Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic // J. Climate. 2014. Vol. 27, pp. 2588–2606.

NOAA Wave Watch 3. URL: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves> (Accessed: 18.04.2015).

Ponce de Leyn S., Guedes Soares C. Distribution of winter wave spectral peaks in the seas around Norway // Ocean Engineering. 2012. Vol. 50. p. 63.

Reistad M., Breivik O., Haakenstad H. et al. A high-resolution hindcast of wind and waves for the North Sea, the Norwegian Sea and the Barents Sea // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. C05019.

Rezhim, diagnoz i prognoz vetrovogo volnenija v okeanah i morjah : nauch.-metod. Posobie. Pod red. E.S. Nesterova [Climate, analysis and forecast of wind waves in the oceans and seas: scientific method. allowance. Ed. E.S. Nesterov], M.: Issled. gruppa «Social'nye nauki», 2013. 295 p. (in Russian).

Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volnenija Barenceva, Ohotskogo i Kaspijskogo morej [Reference data of wind and waves climate of the Barents, Okhotsk Sea and Caspian Sea], SPb.: Rossijskij morskij registr sudohodstva, 2003, 213 p. (in Russian).

SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III ver. 40.51A // University of Technology, Delft, Netherlands, 2007. Vol. 98.

Tolman H.L. Testing of WAVEWATCH III Version 2.22 in NCEP's NWW3 Ocean Wave Model Suite // NOAA/NWS/NCEP/OMB Techn. Note. 2002. Vol. 214. 99 p.

Zelen'ko A.A., Strukov B.S., Resnjanskij Ju.D., Martynov S.L. Sistema prognozirovanija vetrovogo volnenija v Mirovom okeane i morjah Rossii [The forecast system of wind waves in the oceans and seas of Russia], Tr. Gos. okeanograficheskogo in-ta. 2014. Vol. 215, pp. 90–101 (in Russian).

Received 09.06.2015

Accepted 11.09.2015