

РЕЖИМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРА И ВОЛНЕНИЯ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И РАСЧЕТОВ ПО ВОЛНОВОЙ МОДЕЛИ

А.А. Зеленко, Ю.Д. Реснянский, Б.С. Струков

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации;
zelenko@mecom.ru; resn@mecom.ru*

Введение

Сведения о состоянии поверхности моря, почти всегда в той или иной степени возмущенной ветровым волнением, являются одними из самых востребованных со стороны многочисленных пользователей морской гидрометеорологической информации (мореплавание, спасательные операции, морской промысел, освоение минеральных ресурсов, экологические приложения и многие другие). Интересующая пользователей информация о ветровых волнах подразделяется на две основные категории – режимную и оперативную. Под режимной понимаются статистические характеристики ветровых волн, относящиеся к длительным интервалам времени (климат, или режим волн), а под оперативной – актуальные сведения о текущих и ожидаемых в ближайшем будущем изменениях волновых условий.

Оперативные системы прогнозирования ветрового волнения развиваются во многих центрах [1, 6, 13, 15, 18, 19, 23]. В настоящее время прогнозирование, как правило, осуществляется с использованием численных моделей. Наибольшее распространение получили так называемые спектральные модели, основанные на численном решении сеточными методами уравнения баланса

волновой энергии или волнового действия в спектральной форме [7, 16, 22, 24]. Входными данными для таких моделей в их прогностических приложениях служат результаты численного метеорологического прогноза.

Оценка режимных характеристик осуществляется либо с использованием накопленных архивов данных судовых наблюдений за ветровыми волнами [10, 11], либо на основе расчетов по таким же моделям, как и в прогностических приложениях, с тем лишь отличием, что на вход волновых моделей подаются не прогнозы метеорологических полей (в первую очередь скорости ветра), а данные реанализа [3, 5, 20] или им подобные.

Рассчитанные тем или иным образом режимные характеристики ветровых волн могут меняться со временем под воздействием климатических изменений определяющих их метеорологических условий. В настоящее время отмечается ускорение таких изменений, отчетливее всего проявляющихся в повышении приземной температуры воздуха [12]. Поэтому представляет интерес определить возможные изменения режима ветровых волн, связанные с изменениями климатических условий.

Целью данной статьи является оценка режимных характеристик ветра и ветровых волн и их изменений на протяжении последних трех десятилетий на примере Печорского моря.

Исходные данные и методы расчета

Для оценки режимных характеристик скорости ветра и высоты ветровых волн использовалось несколько источников исходных данных.

Основной источник сведений о скорости ветра – данные реанализа метеорологических полей CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) за период 1.01.1979 – 31.12.2009 [17]. Реанализ CFSR представляет собой третью версию реанализов NCEP (Национальных центров прогнозирования состояния окружающей среды, США), в которой устранены имевшие место в прежних версиях ошибки, повышено пространственное и временное разрешение, расширен список усваиваемых данных, усовершенствована процедура анализа, реализован совместный анализ метеорологических

и океанографических данных. В число усваиваемых данных включены, в частности, данные спутниковых скаттерометров ERS-1/AMI, ERS-2/AMI, QuikSCAT и WindSat, что существенно повышает качество анализа используемых данных о скорости приводного ветра.

Данные реанализа обеспечивают регулярное покрытие по пространству и времени. Самая высокая среди реанализов временная (ежечасная) дискретность данных CFSR предоставляет возможность детального прослеживания развития штормовых эпизодов и обеспечивает высокую точность расчета параметров ветрового волнения. Охватываемый этим источником данных 30-летний временной интервал позволяет прослеживать межгодовую/междесятилетнюю изменчивость ветровых условий. Эти данные могут также использоваться для оперативного метеорологического обеспечения морских операций, так как система поддерживает пополнение данных вплоть до сегодняшних дней с небольшой задержкой по времени.

Из всего многообразия данных реанализа выбирались данные по скорости ветра на стандартной высоте 10 м. Пространственное разрешение данных в районе Печорского моря составляет примерно 12×34 км. Дискретность по времени 1 час.

Из набора данных CFSR извлекалась также информация о распределении морского ледового покрова. Такая информация требуется для проведения расчетов ветрового волнения, развитие которого на открытой воде существенно зависит от положения границы льдов.

Дополнительный источник сведений о скорости ветра – спутниковые данные, получаемые с помощью скаттерометра. Эти данные имелись за период 09.07.1987 – 31.12.2011. Их дискретность по времени 6 часов.

Спутниковые измерения, в отличие от реанализов, не имеют регулярного покрытия в пространстве и по времени. Но, в отличие от реанализов, они представляют собой непосредственные измерения с гораздо меньшим, чем в реанализах, влиянием интерполяционных процедур, которые могут приводить к занижению анализируемых значений. Эти данные использовались для оценки репрезентативности данных CFSR и определения необходимости введения поправочных коэффициентов при последующем

использовании этих данных для подсчета статистик ветра и расчета ветровых волн.

Характеристики ветровых волн определялись путем расчетов по спектральной модели WAVEWATCH III version 3.14 [22]. Модель WAVEWATCH III относится к моделям третьего поколения, основанным на решении сеточными методами уравнения баланса спектрального волнового действия в приближении фазового осреднения. В модели учитываются основные процессы развития волн под действием ветра, перераспределение энергии по спектру вследствие нелинейных взаимодействий, процессы ослабления волн из-за донного трения, обрушения, рассеяния энергии на донных неоднородностях. Допускается учет влияния течений, приливов, островов подсеточного масштаба и ледового покрова. Предусматривается возможность построения вложенных сеток с меняющимся разрешением в различных областях и с автоматическим связыванием расчетного процесса на границах областей. Реализуется распараллеливание вычислений средствами OpenMP и средствами MPI.

Получаемые в результате модельных расчетов спектры, представляющие собой функции плотности распределения дисперсии отклонений взволнованной поверхности моря, служат исходными для оценки производных величин, таких как высота значительных волн, средняя длина волн, средний период, направление распространения волн и т. д. Высота значительных волн (англ. significant wave height, SWH), формально определяемая как средняя высота волн, относящихся к верхней трети функции распределения, приблизительно соответствует визуальной оценке высоты волн, даваемой опытным наблюдателем. В дальнейшем изложении для краткости эту величину, представляющую наибольший практический интерес для потребителей морской информации, будем называть просто высотой волн.

Расчеты по указанной модели положены в основу созданной в Гидрометцентре России технологии прогнозирования ветровых волн в Мировом океане и в отдельных морских бассейнах на сроки до 5 суток [1]. Результаты верификации этой технологии свидетельствуют о хорошей точности получаемых таким способом прогнозов. Так, для акватории Мирового океана средние значения ошибок прогнозов (смещения) высоты волн слабо зависели

от заблаговременности, составляя 0,21–0,23 и 0,13–0,14 м относительно спутниковых и буйковых наблюдений соответственно. Среднеквадратичные ошибки для малых заблаговременностей составляли около 0,5 м, а коэффициенты корреляции между прогностическими и измеренными значениями превышали 0,9. Для отдельных морских бассейнов (Черного, Азовского, Каспийского и Балтийского морей) коэффициент корреляции между прогностическими и расчетными значениями составлял 0,80–0,88, а среднеквадратичная ошибка 0,3–0,36 м [2, 4, 21, 25].

Подобные показатели качества данной прогностической системы в терминах среднеквадратичной ошибки и коэффициента корреляции сопоставимы с таковыми для известных по литературным источникам зарубежных систем [8, 9, 13, 18, 19].

Для расчета режимных характеристик ветрового волнения в Печорском море с использованием модели WAVEWATCH III входной информацией служили указанные выше данные CFSR о скорости ветра. Расчеты проведены за период 1980–2009 гг. Для определения граничных условий на жидких границах рассматриваемого здесь Печорского моря расчеты проводились для всей акватории Арктического бассейна на сетке с горизонтальным разрешением $0,25^\circ$ по долготе и $0,1^\circ$ по широте (около 10×10 км в районе Печорского моря), сопряженной с сеткой, покрывающей весь Мировой океан, с горизонтальным разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$. Дискретность вывода результатов составляла 1 час.

Очевидно, что точность таких ретроспективных расчетов не может быть ниже приведенных показателей качества прогнозов по той причине, что расчеты проводятся с использованием более точной, нежели прогнозы, диагностической метеорологической информации.

Ледовые условия

Источником информации о ледовых условиях служили указанные выше данные реанализа CFSR. Сведения о морских льдах там представлены так называемой сплоченностью – относительной долей площади морской поверхности, занятой льдами. Сплоченность изменяется в диапазоне от 0 (чистая вода) до 10 баллов (сплошное покрытие льдом). Данные о сплоченности представлены на такой же сетке, как и данные о ветре. Эти данные, будучи

проинтерполированными на сетку волновой модели, использовались при проведении расчетов ветровых волн. Развитие волн существенно зависит от состояния ледового покрова, полностью подавляющего волны при сплошном покрытии.

Изменчивость ледовых условий в юго-восточной части Печорского моря иллюстрируется рис. 1, на котором показаны зависящие от сезона межгодовые изменения сплоченности льда, осредненные по области в юго-восточной части моря $\lambda = 56,5\text{--}58,0^\circ$ в. д.; $\varphi = 69,0\text{--}69,6^\circ$ с. ш. (ее положение показано треугольными значками на рис. 2 и 3).

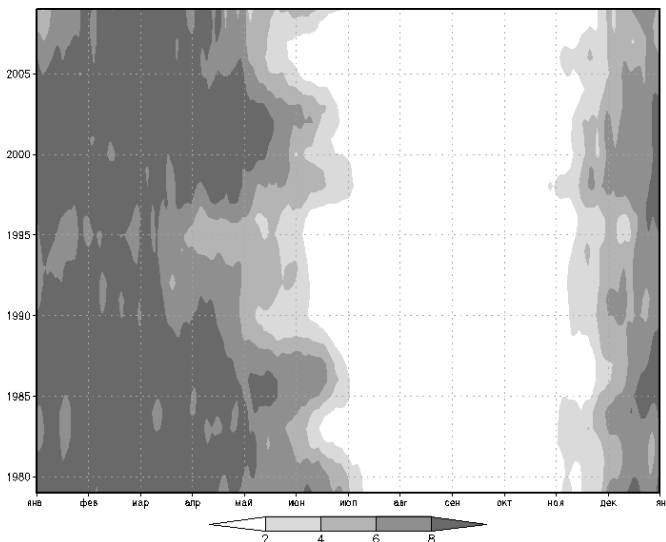


Рис. 1. Межгодовые изменения сплоченности льда, осредненной по квадрату $\lambda=56,5\text{--}58,0^\circ$ в. д.; $\varphi = 69,0\text{--}69,6^\circ$ с. ш.

Из рисунка видно, что сроки появления и исчезновения льда в рассматриваемом районе могут меняться от года к году в диапазоне вариаций до одного месяца, а времена сохранения тяжелых ледовых условий (со сплоченностью свыше 8 баллов) — в еще большем диапазоне. Наиболее легкие ледовые условия в рассматриваемый период наблюдались в 1995 г., а наиболее суровые — в начале 1980 и 2000-х годов.

Оценка репрезентативности данных реанализа по скорости ветра

Получаемые в реанализах значения скорости ветра часто содержат систематические погрешности, или смещения, относительно непосредственно измеряемых фактических значений. Особенно заметными такие смещения бывают при больших скоростях ветра в областях с редкими наблюдениями, в которых велики погрешности горизонтальной интерполяции [14]. Выбранный в качестве основного источника данных о ветре реанализ CFSR отличается от других версий реанализа более высоким пространственным разрешением и расширенным составом усваиваемых данных. В их число включены, в частности, спутниковые скаттерометрические измерения, имеющие хотя и не регулярное, но достаточно высокое пространственное покрытие. При этих условиях можно ожидать, что погрешности, возникающие в системе анализа при обработке данных с привлечением интерполяционных процедур, будут не очень велики.

Для проверки этого предположения и определения возможных систематических погрешностей данных о ветре CFSR проведено сопоставление данных CFSR со спутниковыми скаттерометрическими измерениями за период перекрытия обоих временных рядов 09.08.1987 – 31.12.2009.

Рассчитаны коэффициенты корреляции двух наборов данных, приведенных к одинаковым географическим положениям и одинаковым моментам времени

$$Cor_{ra/sc} = \frac{\overline{U_{sc}U_{ra}}}{\left(\overline{U_{sc}^2} \overline{U_{ra}^2}\right)^{1/2}}, \quad (1)$$

а также определяемые на основе статистической регрессии поправочные коэффициенты к данным реанализа по отношению к скаттерометрическим данным в предположении о наличии лишь мультипликативной регрессионной составляющей

$$b_{ra/sc} = \frac{\overline{U_{sc}^2}}{\overline{U_{sc}U_{ra}}}. \quad (2)$$

В формулах (1), (2) U_{ra} – скорость ветра по данным реанализа в конкретном узле сетки реанализа; U_{sc} – скорость ветра по данным скаттерометра в узле собственной сетки скаттерометра, ближайшем к рассматриваемому узлу сетки реанализа; черта сверху – знак осреднения по времени за весь период перекрытия данных 09.08.1987 – 31.12.2009.

Полученные на основе таких расчетов географические распределения коэффициентов $Cor_{ra/sc}$ и $b_{ra/sc}$ приведены на рис. 2 и 3.

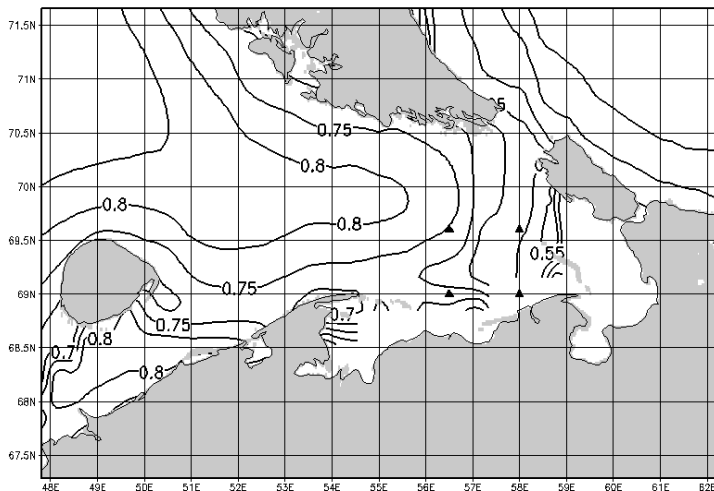


Рис. 2. Географическое распределение коэффициента корреляции $Cor_{ra/sc}$ между скоростью ветра по данным реанализа и по данным скаттерометра, рассчитанного по формуле (1) по данным за 09.08.1987–31.12.2009 в Печорском море. Треугольными значками показаны вершины прямоугольника, в пределах которого проводилось осреднение рассмотренных выше ледовых условий.

Из рис. 2 и 3 видно, что при формальном применении расчетных формул (1) и (2) ко всему набору данных без их предварительного контроля корреляция между двумя типами данных достаточно высока (свыше 0,8–0,85) в открытых частях моря, уменьшаясь до 0,5 с приближением к берегам. Распределение поправочного

коэффициента $b_{ra/sc}$, показанное на рис. 3, почти зеркально по отношению к $Cor_{ra/sc}$. В открытых частях $b_{ra/sc}$ близок к единице и возрастает до 1,2–1,35 у берегов.

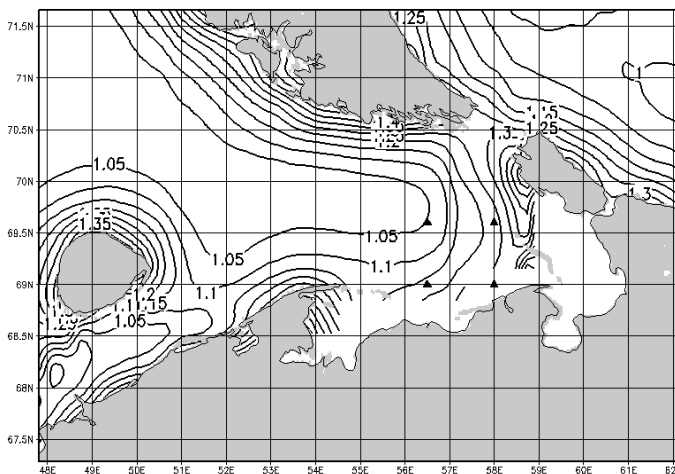


Рис. 3. Географическое распределение поправочного коэффициента $b_{ra/sc}$ к данным реанализа относительно данных скаттерометра, рассчитанного по формуле (2) по данным за 09.08.1987 – 31.12.2009 в Печорском море.

Для выяснения причин таких особенностей построены диаграммы рассеяния скоростей ветра по данным из двух источников. На рис. 4 представлены примеры таких диаграмм для двух точек, одна из которых располагается на небольшом удалении от берега, а вторая в открытой части моря.

Как видно из рис. 4, подавляющее большинство рассматриваемых данных¹ концентрируется вдоль диагонали, что свидетельствует о том, что в большинстве случаев данные из обоих рассматриваемых источников хорошо согласуются друг с другом.

¹ Количество данных, поддающихся сопоставлению, составляет 16524 пар для прибрежной точки и 25234 пар в открытой части моря. Из сопоставления исключаются моменты времени, когда в данной точке отсутствуют измерения скаттерометра. Чаще всего это связано с наличием здесь ледяного покрова.

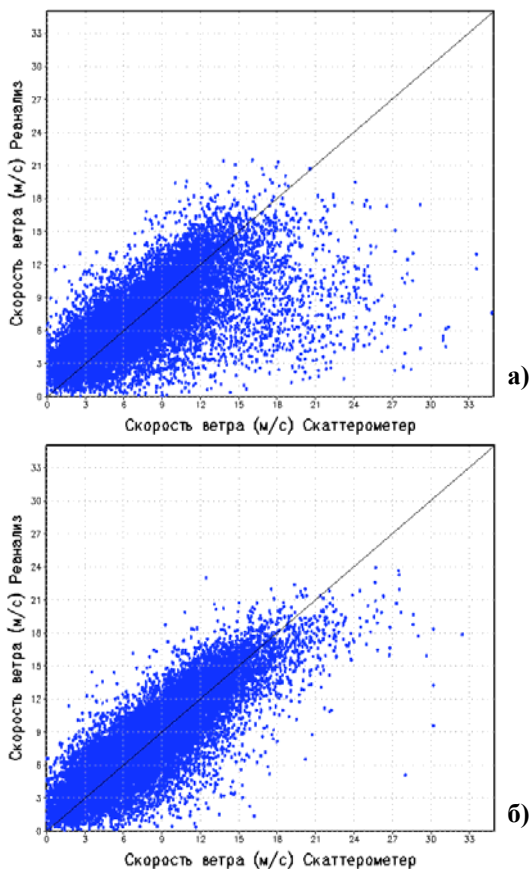


Рис. 4. Диаграммы рассеяния скоростей ветра по данным из двух источников: скаттерометра (горизонтальная ось) и реанализа CFSR (вертикальная ось): вблизи берега ($\lambda = 57,1874^\circ$ в. д., $\varphi = 69,159^\circ$ с. ш.) (а); в открытой части моря ($\lambda = 50,0^\circ$ в. д., $\varphi = 70,5^\circ$ с. ш.) (б).

Снижение коэффициента корреляции и отклонение поправочного коэффициента $b_{ra/sc}$ от единицы определяется появлением группы точек в правом нижнем секторе диаграмм, которые можно считать «выбросами». Их число невелико в открытой части моря и возрастает в районах на небольшом удалении от берега. Характер

расположения «выбросов» указывает на то, что они являются не следствием систематических расхождений, а следствием погрешностей скаттерометрических измерений, точность которых находится в сильной зависимости от эффектов, связанных с близостью берега и от влияния льда, распространение которого чаще всего начинается с мелководных районов.

Согласие данных из указанных двух источников подтверждается и непосредственным сопоставлением изменений скорости ветра на отдельных участках временного ряда при отсутствии льда на этих участках (рис. 5).

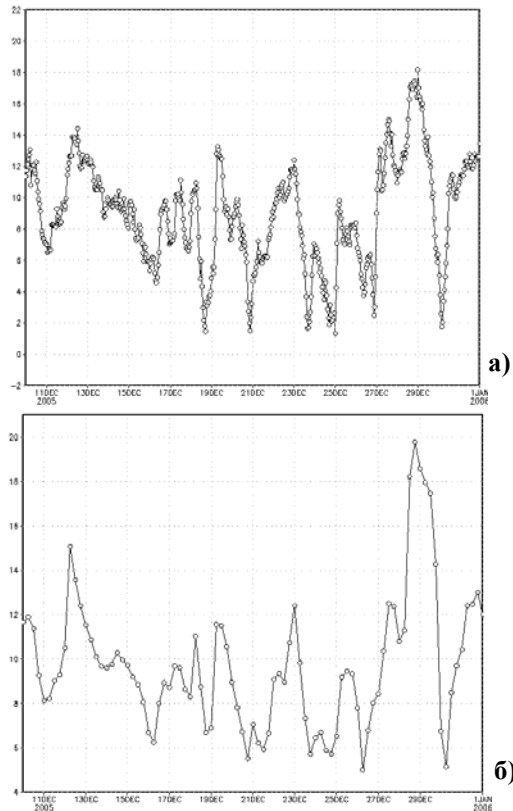


Рис. 5. Модуль скорости ветра (м/с) в точке ($\lambda=50,0$, $\phi=70,5$) по данным реанализа (а) и скаттерометра (б) в период 10.12.2005–1.01.2006.

Приведенные свидетельства позволяют сделать вывод о том, что данные CFSR не содержат значимых систематических смещений относительно непосредственных измерений и могут использоваться для последующих расчетов без введения поправочных коэффициентов.

Ветровые условия. Вероятности превышения пороговых значений скорости

Для прослеживания динамики многолетней изменчивости все статистики, включая интегральные функции распределения скорости ветра и высоты ветровых волн, подсчитаны для трех десятилетних периодов: 1980–1989, 1990–1999 и 2000–2009 гг.

Вместо интегральной функции распределения, определяемой в математической статистике для случайной величины X как $F(x) = P(X < x)$, в дальнейшем мы будем рассматривать дополнение к функции распределения $F'(x) = 1 - F(x) = P(x \leq X)$, представляющее собой вероятность превышения величиной X заданного значения x . Для кратности $F'(x)$ будем называть функцией распределения и выражать ее значения в процентах.

Вероятности превышения скорости ветра построены для пороговых значений скорости ($x = U$, U – скорость ветра) 7,5; 10; 12,5; 15 м/с и для трех периодов: май–август, сентябрь–декабрь и весь год (январь–декабрь).

Пример географических распределений таких вероятностей для порогового значения 10 м/с за период сентябрь–декабрь показан на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что в открытой части моря имеет место сравнительно однородное распределение повторяемостей сильных ветров с характерным значением $F'(x)|_{x=10} \approx 35\%$. Во всех прибрежных районах отмечается уменьшение таких повторяемостей, свидетельствующее об ослаблении интенсивности ветра с приближением к суше. Непосредственно у берегов эта повторяемость уменьшается почти в два раза в сравнении с открытым морем.

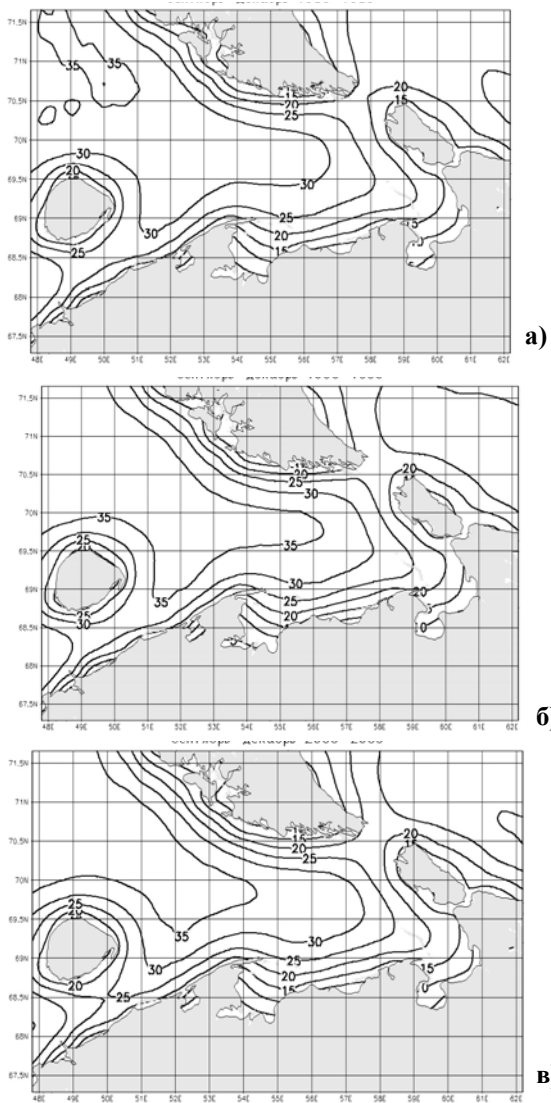


Рис. 6. Вероятности превышения скорости ветра 10 м/с (%) в период сентябрь–декабрь для трех десятилетий: 1980–1989 гг. (а), 1990–1999 гг. (б), 2000–2009 гг. (в).

Из сравнения трех панелей на рис. 6, иллюстрирующих междесятилетнюю изменчивость ветровых условий, следует также, что на рассматриваемом 30-летнем интервале существенных изменений ветрового режима не прослеживалось, хотя и отмечалось небольшое (примерно на 5 %) увеличение повторяемостей во второе десятилетие 1990–1999 гг. в сравнении с 1980–1989 и 2000–2009 гг. Отчетливого же тренда на протяжении всего рассматриваемого периода, который можно было бы связать с изменениями климата, не прослеживается.

Статистика высот ветровых волн

Вероятности превышения высот ветровых волн, рассчитанных указанным выше способом, построены для пороговых значений высот 1,5; 2; 2,5; 3, 4 и 5 м для таких же, как и для ветра, хронологических периодов (1980–1989, 1990–1999, 2000–2009 гг.) и сезонов: май–август, сентябрь–декабрь и весь год (январь–декабрь).

Пример географических распределений таких вероятностей для порогового значения 3 м за период сентябрь–декабрь показан на рис. 7.

Как и для ветра, повторяемость сильного волнения оказывается наибольшей в открытых частях моря, уменьшаясь с приближением к берегам. В отличие от ветра, однако, распределение повторяемостей оказывается существенно более неоднородным даже в открытом море с отчетливым увеличением в северо-западном направлении. Это объясняется тем, что генерация и развитие волн определяются не только локальным действием ветра, но в не меньшей степени и горизонтальным перераспределением волновой энергии, зависящим от геометрии морского бассейна.

Что касается междесятилетней изменчивости, то наблюдается небольшое, примерно такое же, как и для ветра, увеличение повторяемостей высот значительных волн в 1990–1999 гг., что и следовало ожидать, так как определяющим фактором генерации и развития волнения являются ветровые условия, содержащие признаки некоторого усиления в этот период.

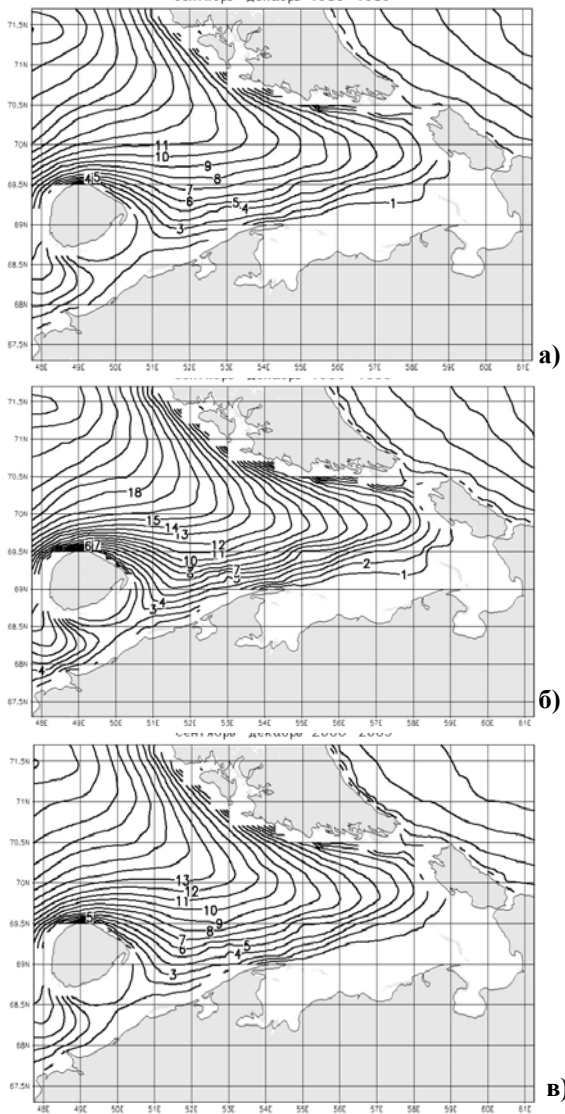


Рис. 7. Вероятности превышения высот волн 3 м (%) в период сентябрь–декабрь для трех десятилетий: 1980–1989 гг. (а), 1990–1999 гг. (б), 2000–2009 гг. (в).

Заключение

Результаты рассмотрения имеющихся данных о ветровых условиях, включающие данные реанализа CFSR и спутниковые данные скаттерометрических измерений, свидетельствуют о том, что современные системы метеорологического реанализа все в большей степени отражают детальную структуру метеорологических условий, фиксируемую непосредственными наблюдениями, свободными от сглаживающего влияния процедур усвоения, применяемых в системах метеорологического реанализа.

На протяжении трех десятилетий в период 1980–2009 гг. ветровые условия в Печорском море не претерпевали значимых изменений несмотря на наблюдаемое в настоящее время потепление климата, наиболее отчетливо выраженное в высоких широтах.

На этих интервалах времени не отмечалось и заметных изменений режима ветровых волн, оцениваемого с использованием расчетов по одной из современных волновых моделей.

Список использованных источников

1. Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. Исследования океанов и морей. – 2014. – Вып. 215. – С. 90–101.

2. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане // Информационный сборник № 43. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2016. – С. 133–147.

3. Справочные данные по режиму ветра и волнения шельфа Баренцева и Карского морей. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013. – 334 с.

4. Струков Б.С., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытания для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. – 2013. – С. 64–79.

5. *Arkhipkin V. S., Gippius F. N., Koltermann K. P., Surkova G. V.* Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2014. – Vol. 14. – P. 2883–2897. – doi:10.5194/nhess-14-2883-2014.

6. *Bidlot J.R., Holt M.W.* Verification of operational global and regional wave forecasting systems against measurements from moored buoys // JCOMM Technical Report No. 30. – 2006. WMO/TD-No. 1333. – 11 p.

7. *Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H.* A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation // *J. Geophys. Res.* – 1999. – Vol. 104. – P. 7649–7666.

8. *Chu Peter C., Qi Yiquan, Chen Yuchun, Shi Ping, Mao Qingwen.* South China Sea Wind-Wave Characteristics. Part I: Validation of WA-VEWATCH III Using TOPEX/Poseidon Data // *J. Atm. Ocean. Tech.* – 2004. – Vol. 21. – P. 1718–1733.

9. *Da Rocha Rosmeri Porfirio, Sugahara Shigetoshi, Da Silveira Reinaldo Bonfim.* Sea Waves Generated by Extratropical Cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and Validation against Altimeter Data // *Wea. Forecast.* – 2003. – Vol. 19. – P. 398–410.

10. *Gulev S.K., Grigorieva V.* Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data // *Geophys. Res. Lett.* – 2004. – Vol. 31. – L24302. – doi: 10.1029/2004GL021040.

11. *Gulev S.K., Grigorieva V., Sterl A., Woolf D.* Assessment of the reliability of wave observations from voluntary observing ships: insights from the validation of a global wind wave climatology based on voluntary observing ship data // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108(C7). – P. 3236. – doi: 10.1029/2002JC001437.

12. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. –2013. – 1535 p. – doi: 10.1017/CBO9781107415324.

13. *Janssen P.A.E.M., Hansen B., Bidlot J-R.* Verification of the ECMWF Wave Forecasting System against Buoy and Altimeter Data // *Wea. Forecast.* – 1997. – Vol. 12. – P. 763–784.

14. *Li M., Liu J., Wang Z. et al.* Assessment of Sea Surface Wind from NWP Reanalyses and Satellites in the Southern Ocean // *J. Atmosph. Ocean. Tech.* – 2013. – Vol. 30, No. 8. – P. 1842–1853.

15. *Ponce de León S., Orfila A., Gómez-Pujol L., Renault L., Vizoso G., Tintoré J.* Assessment of wind models around the Balearic Islands for operational wave forecast // *Appl. Ocean Res.* – 2012. – Vol. 34. – P. 1–9. – doi:10.1016/j.apor.2011.09.001.

16. *Ris R.C., Holthuijsen L.H., Booij N.A.* third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification // *J. Geophys. Res.* – 1999. – Vol. 104. – P. 7667–7681.

17. *Saha S., Moorthi S., Pan H.-L. et al.* The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 2010. – Vol. 91. – P. 1015–1057. – doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.

18. *Silva F. Sansana, Pinto J. P., Almeida S.* Operational Wave Forecasting System for the Portuguese Coast // *J. Coastal Research. SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium).* – 2009. – P. 1055–1059.

19. *Sølvsteen C., Hansen C.* Validation of the Operational Wave Models WAVEWATCH III and Mike21-OSW against Satellite Altimetry and Coastal Buoys / Royal Danish Administration of Navigation and Hydrography. Rpt. NR K.4. Copenhagen. – 2006. – 52 p.

20. *Sierl A., Komen G.J., Cotton P.D.* Fifteen years of global wave hindcasts using winds from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis: Validating the reanalyzed winds and assessing the wave climate // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103. – P. 5477–5492.

21. *Strukov B.S., Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L.* Verification of the Wind Wave Forecasting System for the Black, Azov and Caspian Seas // *Res. Act. Atm. Ocean. Model.* – Report No. 42. May 2012. WCRP Informal Report No. 5/2012. – P. 08-05–08-06.

22. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276. – 2009. – P. 1–194 + Appendices [Available at <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>].

23. *Vrazhkin A.N.* Application of spectral wave model for some areas of the Far Eastern Seas and the Pacific Ocean // *Pacific Oceanography.* – 2013. – Vol. 6, No. 1. – P. 5–9.

24. *WAMDI Group: Hasselmann S. et al.* The WAM model – a third generation ocean wave prediction model // *J. Phys. Oceanogr.* – 1988. – Vol. 18. – P. 1775–1810.

25. *Zelenko A.A., Strukov B.S., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L.* Verification of the wind wave forecasting system for the Baltic sea // *Res. Act. Atm. Ocean. Model.* – WCRP Report No. 12/2015. – 2015. – P. 8-23–8-24.

Поступила в редакцию 11.07.2016 г.