МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.466

С.А. Мысленков[1], М.Ю. Маркина[2], В.С. Архипкин[3], Н.Д. Тилинина[4]

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ШТОРМОВОГО ВОЛНЕНИЯ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

Приведены оценки повторяемости штормового волнения в Баренцевом море. Результаты получены на основе данных моделирования ветрового волнения с 1979 по 2010 гг. при помощи волновой модели WAVEWATCH III на неструктурной сетке. Для каждого месяца в Баренцевом море рассчитано количество случаев с различной высотой значительных волн от 4 до 10 м. Проведена оценка межгодовой изменчивости повторяемости штормового волнения.

В повторяемости штормового волнения в Баренцевом море за весь период с 1979 по 2010 гг. значимый линейный тренд отсутствует. Для случаев с высотой волн более 6 м с 1979 по 1991 гг. наблюдалось увеличение повторяемости, с 1991 по 2002 гг. уменьшение, после 2003 г. – увеличение. Для случаев с высотой волн более 6 м максимальные значения повторяемости наблюдаются в 1990–1993 гг. Межгодовая изменчивость повторяемости штормового волнения очень велика (для разных годов количество случаев штормового волнения может меняться в 2–3 раза). Коэффициент корреляции между индексом Арктического колебания и повторяемостью волнения высотой более 7 м составляет 0,6. Коэффициент корреляции количества глубоких циклонов с повторяемостью волнения высотой более 7 м составляет 0,67.

Ключевые слова: штормовая активность, ветровое волнение, Баренцево море, моделирование волнения, WAVEWATCH III

Введение. В наше время наблюдается повышенный интерес к исследованию гидрометеорологических условий Арктических морей. Это связано с активным хозяйственным освоением данного региона: здесь идет активная разведка, добыча и транспортировка полезных ископаемых, развивается рыбный промысел, это район интенсивного судоходства. Одним из ключевых лимитирующих факторов для хозяйственной деятельности и судоходства является ветро-волновой режим.

Последнее десятилетие характеризуется значимым сокращением площади многолетнего и сезонного льда в Арктике [Шалина, 2013] и появлением значительно большей свободной ото льда поверхности моря. Это потенциально может привести к изменениям ветро-волнового режима в Арктическом регионе. В современном климате происходят изменения в повторяемости и траекториях циклонов [Tilinina et al., 2014], а также меняется повторяемость высоких скоростей ветра. Г.В. Сурковой с соавт. [Суркова, Крылов, 2016] показано, что в период с 1981 по 2010 гг. наблюдается слабое уменьшение повторяемости скорости ветра 95 и 99 процентилей над Баренцевым морем. Также отмечается период высокой повторяемости экстремальных значений скорости ветра в начале 1990-х годов. Согласно докладам [Второй, 2014; IPCC, 2013], в последние десятилетия наблюдается слабое уменьшение скорости ветра в средних и высоких широтах, но их рост к северу от 75–80° с. ш. В исследованиях атмосферных циркуляционных процессов с позиций классификации Б.Л. Дзердзеевского отмечено, что в этот период резко усиливается повторяемость процессов южного меридионального типа. При таком типе циркуляции зарождающиеся в Северной Атлантике циклоны распространяются преимущественно севернее в Арктику [Кононова, 2015; Tilinina et al., 2013]. Следовательно, можно ожидать увеличение штормовой активности в Баренцевом море.

Особенности ветрового режима и волнового климата Баренцева моря приведены в Справочных данных [Справочные …, 2003], где, в частности, показано, что высота волн 50%-ной обеспеченности с повторяемостью 1 раз в год составляет 6,1 м, а для 0,1%-ной обеспеченности – >19 м. Периоды, в течение которых скорость ветра не превышает 15 м/с, в зимние месяцы в среднем составляют 3–6 дней. То есть значительную часть года над акваторией Баренцева моря преобладает штормовые погодные условия.

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с.; Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, канд. физ-мат. н.; *e-mail*: stasocean@gmail.com

[2] Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, стажер-исследователь, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, аспирант; *e-mail*: markina@sail.msk.ru

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

[4] Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, науч. с., канд. физ-мат. н.; *e-mail*: tilinina@sail.msk.ru

Также сведения о режиме ветрового волнения Баренцева моря представлены в иностранных работах [Stopa et al., 2016; Liu et al., 2016], но данных о многолетней изменчивости повторяемости штормового волнения в них не приведено.

При анализе ветро-волнового режима над открытыми морскими акваториями главной проблемой является отсутствие регулярных по пространству и времени данных наблюдений о параметрах волн. При отсутствии данных реанализа полей ветра и волнения за период времени длительностью несколько десятков лет можно использовать результаты вероятностного моделирования временной структуры штормов [Мастрюков, 2014]. Однако в наши дни одним из основных подходов для исследования ветро-волнового режима является использование спектральных волновых моделей, позволяющих восстанавливать характеристики ветрового волнения [Режим …, 2013].

В нашей работе на основе ретроспективных расчетов волнения с высоким пространственным и временным разрешением производится оценка повторяемости случаев штормового волнения в Баренцевом море за период с 1979 по 2010 гг.

Материалы и методы исследований. На сегодняшний день использование спектральных волновых моделей является наиболее точным и современным методом для исследования режимных и экстремальных характеристик ветрового волнения. При сравнении высот волн, полученных на основе данных реанализов и спектральной волновой модели, с данными прямых измерений корреляция обычно составляет 0,8–0,9, а среднеквадратическая ошибка 0,3 м [Дымов с соавт., 2004; Мысленков, Платонов с соавт., 2015; Rusu et al., 2014; Reistad et al., 2011; Stopa et al., 2016].

Для проведения расчетов волновых характеристик в Баренцевом море использована спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III (WW3) версии 4.18 [Tolman, 2014]. Модель WW3 является развитием модели WAM в отношении функции источника и функции нелинейного взаимодействия [Режим …, 2013]. В основе модели лежит численное решение уравнения спектрального баланса волновой энергии:

$$\frac{\partial E(\omega,\theta,\vec{x},t)}{\partial t}+\vec{V}(\omega,\theta)\nabla E=S(\omega,\theta,\vec{x},t), \qquad (1)$$

где ω и θ – частота и направление распространения спектральной составляющей волновой энергии; $E(\omega,\theta,\vec{x},t)$ – двумерный спектр энергии в точке с векторной координатой $\vec{x}$ в момент времени t; $\vec{V}(\omega,\theta)$ – групповая скорость спектральных составляющих; $S(\omega,\theta,\vec{x},t)$ – функция,описывающая источники и стоки волновой энергии: передачу энергии от ветра к волнам и диссипацию энергии, а также нелинейные взаимодействия волн. Интегрирование уравнения баланса энергии осуществляется с помощью конечно-разностных схем по географическому и спектральному пространствам.

В данной работе для генерации волн используется схема ST1. Для расчета нелинейных взаимодействий была использована параметрическая схема DIA (Discrete Interaction Approximation), которая является стандартным приближением для расчета нелинейных взаимодействий во всех современных волновых моделях [Tolman, 2014].

Для учета влияния льда была использована схема IC0, в которой при сплоченности льда более 0,25 (сплоченность задается в модели в долях от 0 до 1) узел сетки считается покрытым льдом, и включается экспоненциальное затухание волновой энергии с поправкой на сплоченность льда в данном узле.

В узкой прибрежной зоне помимо обрушения волн из-за длительного воздействия ветра на морскую поверхность (входит в схему ST1), рассчитывается также увеличение высоты волн при подходе к берегу и связанное с ним обрушение по достижении критического значения крутизны волны. Для учета воздействия придонного трения используется стандартная схема JONSWAP [Tolman, 2014], диссипация волновой энергии параметризуется в зависимости от отношения фазовой и групповой скоростей волн, а также глубины в точке. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений ($\Delta\theta$=10°), частотный диапазон σ – 36 интервалов от 0,03 до 1,1 Гц.

Вычисления проводились на оригинальной неструктурной сетке, созданной на основе базы данных о рельефе дна ETOPO1 с пространственным разрешением одна морская миля и данных навигационных карт. Вычислительная сетка модели покрывает Баренцево и Карское моря, а также всю северную часть Атлантического океана (рис. 1). Неструктурная сетка состоит из 16 792 узлов, пространственное разрешение варьирует от 1° (в Атлантическом океане) до 15 км (в Баренцевом море). Ранее эта сетка успешно использовалась для моделирования волнения [Мысленков с соавт., 2016; Myslenkov et al., 2018]. Необходимость учета зыби, распространяющейся из данных акваторий, при расчете высоты значительных волн в Баренцевом море была наглядно показана ранее [Мысленков, Архипкин с соавт., 2015].

Выдача результатов производится с шагом 3 ч. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового действия составляет 15 минут, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии – 60 секунд, шаги по времени для передачи энергии по спектру и удовлетворения условию Куранта-Фридрихса-Леви – 450 секунд. Данный выбор продиктован конфигурацией вычислительной сетки: максимальным и минимальным расстоянием между узлами и большой широтной протяженностью.

В качестве вынуждающей силы были использованы данные о ветре на высоте 10 м из реанализа NCEP/CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) [Saha et al., 2010], который охватывает период с 1979 по 2010 гг., имеет пространственное разрешение ~0,3° и шаг по времени 1 час. Поля сплоченности льда также были взяты из реанализа NCEP/CFSR.

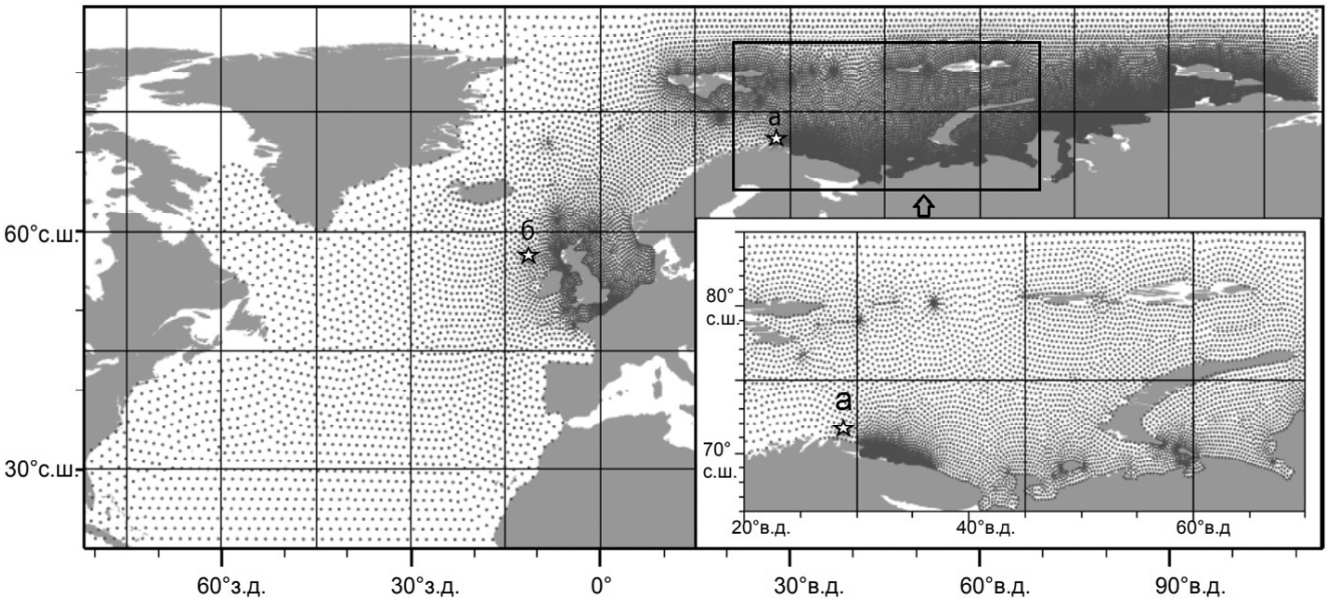

Рис. 1. Неструктурная сетка для Северной Атлантики и Баренцева моря (звездочками отмечено расположение волновых буев)

Fig. 1. Unstructured grid for the North Atlantic and the Barents Sea (asterisks show the location of wave buoys)

В результате проведенных расчетов для каждого узла вычислительной сетки получены характеристики ветрового волнения за каждые 3 часа с 1979 по 2010 гг. (всего 32 года): высота значительных волн *Hs* (среднее значение от 1/3 наиболее высоких волн в спектре волнения или 13% обеспеченности), среднее направление распространения волн, средний период волн, средняя длина волны, средняя высота зыби, пиковый период волн, перенос энергии. На основе этих данных были рассчитаны максимальные и среднемноголетние значения высоты значительных волн.

Для каждого месяца или года в Баренцевом море в пределах области 20–65° в. д., 67–89° с. ш. было рассчитано количество случаев штормового волнения с различной высотой значительных волн от 4 до 10 м. Методика расчета заключалась в следующем: если хотя бы в одном узле в области поиска величина высоты волн превышает 4 м, то данное событие причисляется к случаю штормового волнения с критерием >4 м. Это событие продолжается до тех пор, пока на всех узлах высота волн не станет меньше критерия. Далее, если в одном из узлов опять превышен критерий, то это событие причисляется к следующему случаю. Чтобы исключить возможные ошибки, между двумя случаями штормового волнения должно пройти не менее 9 часов. Данная методика имеет погрешность, связанную со штормами, идущими подряд или с разных направлений. Однако такие случаи встречаются редко. Как показал визуальный анализ, проведенный для нескольких лет, предлагаемый алгоритм работает корректно. События с высотой волн 2–3 м встречаются в Баренцевом море практически постоянно, что не всегда может быть связано со штормом в Баренцевом море, а, например, с зыбью, приходящей из северной Атлантики [Мысленков, Архипкин с соавт., 2015], поэтому события с высотой волн менее 4 м не выделялись как отдельные шторма.

К сожалению, для Баренцева моря практически отсутствуют данные прямых измерений волнения. Для сопоставления с данными моделирования использованы данные волновых буев Oceanor, установленных в Норвежском море [www.oceanor.com]. Данные о значимой высоте волны доступны за период с 2014 по 2015 гг. с шагом по времени 1 час. Также привлекались данные буев из базы данных Британского океанографического центра [www.bodc.ac.uk], расположенных у побережья Великобритании, где имеются данные за отдельные сезоны с 1979 по 2000 гг.

Также для анализа привлекались данные индексов циркуляции атмосферы: Северо-Атлантического колебания (САК) и Арктического колебания (АК). Арктическое колебание описывается изменениями первой эмпирической ортогональной функции давления на уровне моря в Северном полушарии (20–90° N) зимой. Один центр давления находится в Арктике, а другой – в области между 37° и 45° N [Huth et al., 2008]. Выделяют две фазы АК – отрицательную и положительную. При положительной фазе АК шторма из северной Атлантики проходят севернее. Данные расчета атмосферных индексов доступны на сайте NOAA (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml).

Идентификация и построение траекторий циклонов (трекинга) проводилась с использованием численного алгоритма [Zolina, Gulev, 2002; Tilinina et al., 2013]. Алгоритм заключается в нахождении и отслеживании в поле давления локальных минимумов в полярной орфографической проекции с регулярной сеткой, покрывающей Северное полушарие

(181×181 точка). Данные реанализа ERA-Interim [Dee et al., 2011] с шагом по времени 6 часов были интерполированы на эту сетку с использованием модифицированного метода локальных процедур [Akima, 1970]. Результатом трекинга являются следующие данные – координаты центра циклона, давление в центре циклона и маркер времени. Картирование тренда в количестве циклонов осуществлялось на циркулярной сетке с площадью ячейки 155 000 км^2 и удаленностью между ячейками – 2° [Tilinina et al., 2013]. Под повторяемостью циклонов мы понимаем частоту возникновения циклонов в определенной ячейке сетки. Например, если в какой-то ячейке сетки постоянно располагался центр циклона, то повторяемость равнялась количеству 6-часовых сроков в рассматриваемом периоде для этой ячейки сетки.

Результаты. На первом этапе была проведена оценка качества моделирования волнения на основе инструментальных данных. Результаты сопоставления высоты значительных волн в ближайших узлах модельной сетки к положению океанских буев представлены на рис. 2: приводятся данные сравнения с буем Nordkin (А) в 2014 г. и с буем № 507815 (данные Британского океанографического центра) (Б) в 1995 г. Модель успешно воспроизводит как абсолютные значения, так и изменчивость высоты волн. Коэффициент корреляции для обоих рядов на рис. 2,А и Б находится в пределах 0,8–0,9, среднеквадратическая ошибка до 0,9 м. Полученные результаты согласуются с оценками качества других реализаций волновых моделей в данном районе [Дымов с соавт., 2004; Rusu et al., 2014; Reistad et al., 2011; Stopa et al., 2016; Справочные …, 2003], и позволяют использовать полученный массив данных для оценки межгодовой изменчивости повторяемости штормового волнения.

Распределение максимальной и среднемноголетней высоты значительных волн для Баренцева моря за период моделирования (1979–2010) приведено на рис. 3, А, Б. Максимальные величины наблюдаются на границе Баренцева и Норвежского морей и составляют 15–16 м. В центральной части Баренцева моря максимальная высота значительных волн достигает 12–14 м. В Справочных данных [Справочные …, 2003] показано, что максимальная высота значительных волн в Баренцевом море, возможная 1 раз в 25 лет, составляет 13 м, 1 раз в 50 лет – 13,7 м. Наши результаты несколько отличаются от этих оценок и могут являться результатом использования разной конфигурации модели и граничных условий. Средняя многолетняя высота значительных волн составляет 1,8–2,2 м для центральной части Баренцева моря (рис. 3, Б).

Анализ повторяемости случаев штормового волнения различной высоты в Баренцевом море пред-

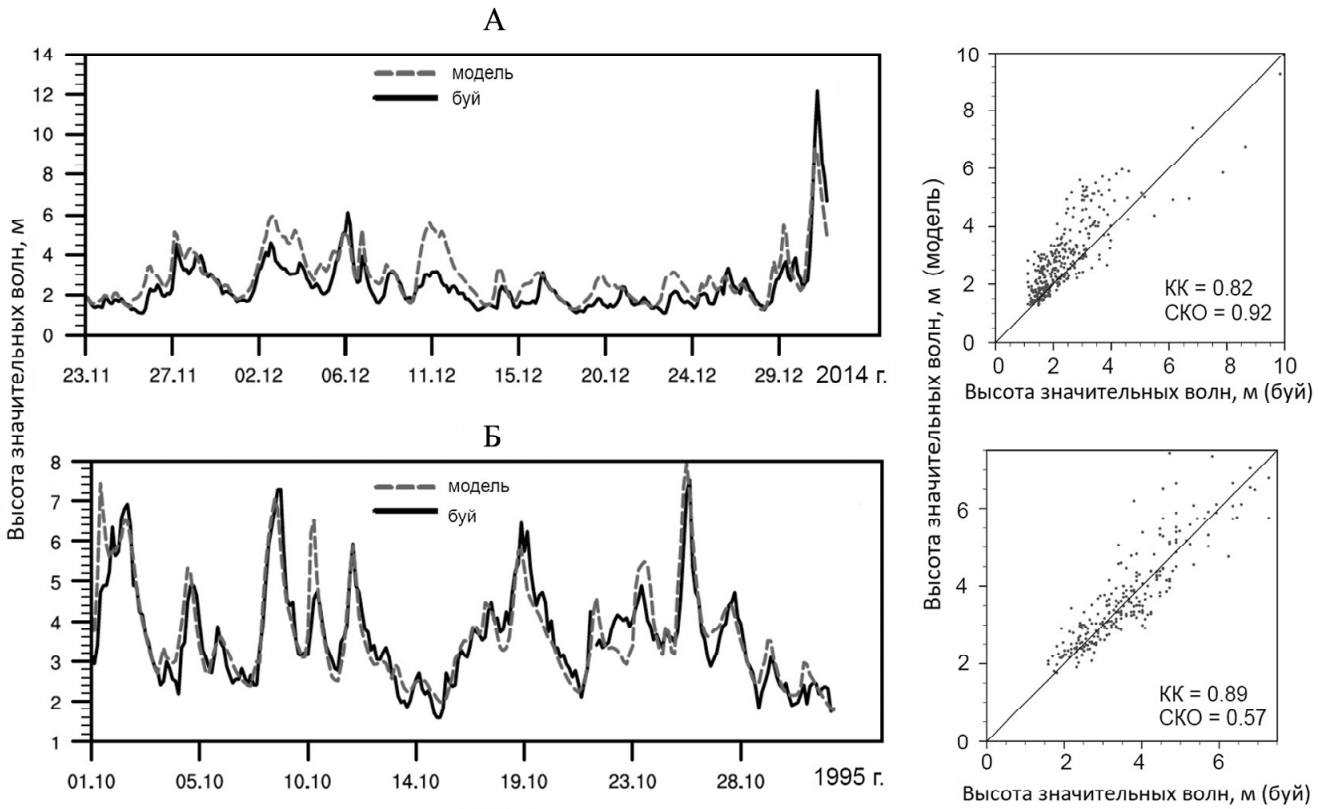

Рис. 2. Сопоставление высоты волн по измерениям на буях с результатами моделирования: А – буй в Норвежском море, Б – буй у побережья Ирландии

Fig. 2. Comparison between simulated wave heights and buoy measurements (А – Norwegian Sea, Б – near the coast of Ireland)

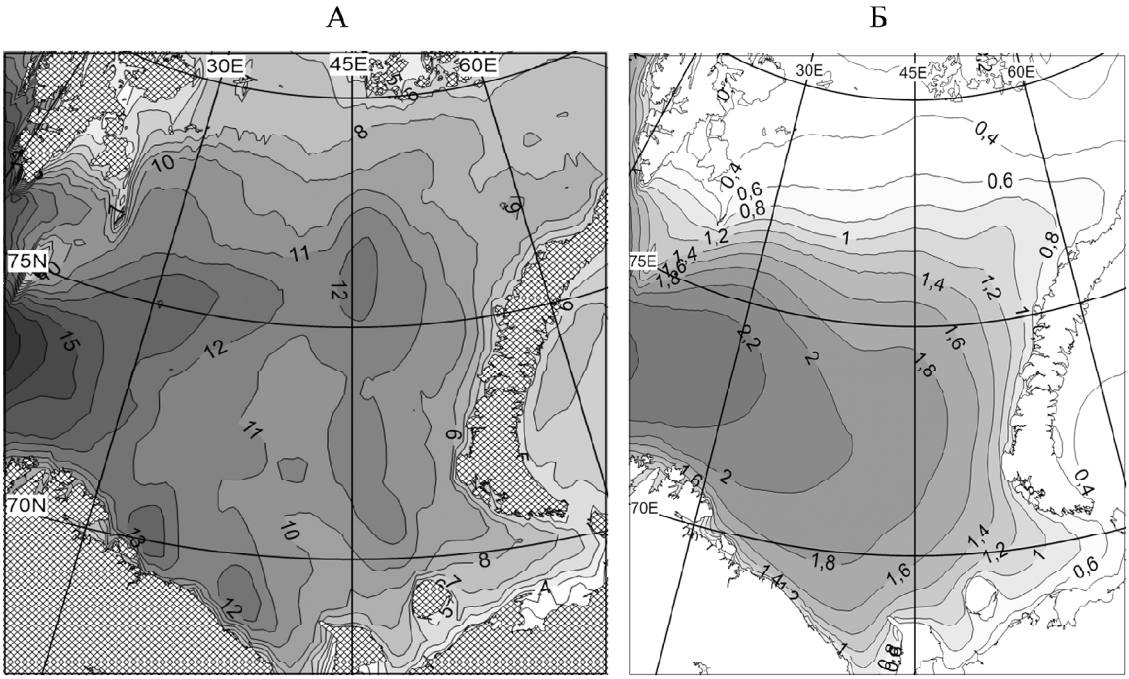

Рис. 3. Максимальная (А) и среднемноголетняя (Б) высота значительных волн в Баренцевом море по данным моделирования за период с 1979 по 2010 гг.

Fig. 3. Maximum (A) and mean (Б) significant wave heights in 1979–2010 based on WW3 hindcast

ставлен на рис. 4. Случаи с высотой волн более 4 м наблюдаются в среднем 70–80 раз в год, более 5 м – 40–60 раз в год. Повторяемость случаев с высотой волн более 4 м не имеет выраженных трендов, однако, наблюдается локальный максимум в 2005 г. Для случаев с высотой волн более 6 м максимальные значения повторяемости наблюдаются в 1990, 1991 или 1993 годах. Для штормового волнения с высотой более 6 м весь период был разбит на 3 отрезка, для которых были построены линейные тренды. За период с 1979 по 1991 гг. наблюдалось увеличение повторяемости, с 1991 по 2002 гг. уменьшение, а далее снова небольшое увеличение. В среднем за весь период с 1979 по 2010 гг. тенденций на однозначное увеличение количества случаев штормового волнения не отмечается. В целом межгодовая изменчивость повторяемости штормового волнения очень велика (стандартное отклонение составляет 6 случаев. Например, в 1991 г. зафиксировано 30 случаев с высотой волн более 7 м, а в 2001 г. практически в 3 раза меньше – 11.

Необходимо отметить, что для экстремальных случаев с высотой волн 9–10 м, максимальные значения наблюдаются не в 1990 г. (как и для случаев с высотой волн более 7 и 8 м), а в 1993 г. Это связано с большей повторяемостью экстремальных скоростей ветра в этот год. Г.В. Сурковой с соавт. [Суркова, Крылов, 2016] показано, что значения скорости ветра обеспеченности 1 и 0,1% в Баренцевом море имеют максимум именно в 1993 г. А для менее экстремальных событий с обеспеченностью 5% максимум приходится на 1990 г.

Основными циркуляционными особенностями атмосферы, влияющими на погодные условия и циклоническую деятельность в Северной Европе, являются Северо-Атлантическое колебание и Арктическое колебание, поэтому прежде всего были проанализированы связи повторяемости случаев штормового волнения с вышеуказанными индексами. Проведенный корреляционный анализ повторя-

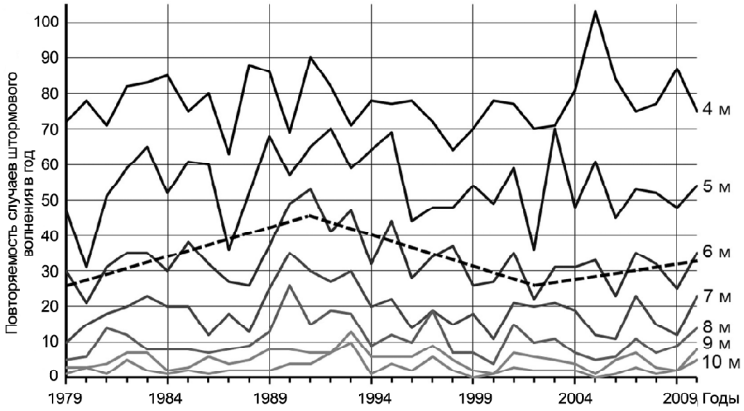

Рис. 4. Межгодовая изменчивость повторяемости штормового волнения с различной высотой волн

Fig. 4. Interannual variability of frequency of storms with different thresholds

емости за год штормового волнения различной высоты волн со среднегодовыми значениями индексов циркуляции показал, что связь выше с индексом Арктического колебания для случаев с высотой волн 7–9 м. Максимальное значение коэффициента корреляции составляет 0,46 и наблюдается для штормового волнения более 7 м. Визуально эту связь можно проследить на рис. 5. Если рассматривать ряд ежемесячных значений повторяемости штормов и индекса Арктического колебания, то максимальный коэффициент корреляции наблюдается при осреднении индекса и повторяемости с декабря по март и составляет 0,6 для штормов более 7 м, и 0,57 для штормов более 8 м.

Повторяемость штормового волнения с высотой волн более 6–7 м скорее всего связана с прохождением циклонов, поэтому на следующем этапе было проведено сравнение ежемесячной повторяемости штормов с повторяемостью циклонов на акватории Баренцева моря. Обнаружено, что для всего ряда ежемесячных данных корреляция общего количества циклонов с повторяемостью случаев штормового волнения разной высоты практически отсутствует. Некоторая связь наблюдается при сравнении повторяемости глубоких циклонов и штормового волнения с высотой волн более 5 м. Максимальный коэффициент корреляции 0,55 наблюдается при сравнении повторяемости глубоких циклонов и повторяемости штормового волнения с высотой волн более 6 м. Если рассматривать ряд ежемесячных значений повторяемости штормового волнения и повторяемости глубоких циклонов, то максимальный коэффициент корреляции так же, как и в случае с арктическим колебанием, наблюдается при осреднении за период с декабря по март и составляет 0,67 для высоты волн более 7 м.

Анализ линейных трендов, приведенных на рис. 3 выполнен для всей акватории Баренцева моря. Однако представляет интерес также анализ трендов в пространстве, так как в каждой точке исследуемой акватории, вообще говоря, климатические тенденции могут различаться. На рис. 6 представлено распределение трендов повторяемости штормового волнения с высотой волн более 7 м в пространстве за период с 1979 по 1990 гг., когда на акватории Баренцева моря наблюдалось увеличение количества случаев штормового волнения. Также на рис. 6 отражены тренды повторяемости глубоких циклонов по пространству. Количество дней с высотой волн более 7 м увеличивается приблизительно на 1–2 дня за сезон (декабрь–март) в Северной Атлантике в секторе 50–65 с. ш. В Баренцевом море также отмечается рост, однако только на 0,5 случая в год. Повторяемость глубоких циклонов увеличилась с 1979 по 1990 гг. на всей акватории на 2–4 случая за сезон, однако, например, у берегов Норвегии наблюдается отрицательный тренд. Это свидетельствует об изменении траекторий глубоких циклонов. Распределение трендов штормового волнения в пространстве существенно более равномерное, чем у циклонов. Это объясняется тем, что морские волны формируются сначала под воздействием ветра и далее могут распространяться на большие расстояния, даже при отсутствии ветра (или циклона) в виде зыби высотой 5–7 м. Из-за этого также наблюдаются невысокие значения коэффициента корреляции при сопоставлении повторяемости циклонов и штормового волнения для локально выбранной акватории Баренцева моря.

Безусловно, в Арктическом регионе часть случаев штормового волнения вызывается полярными мезомасштабными циклонами [Луценко, Лагун, 2013; Smirnova, Golubkin, 2017]. Однако, определение характеристик циклонов (типа, генезиса, направления, скорости перемещения и др.) и выявление их влияния на развитие штормового волнения в Барен-

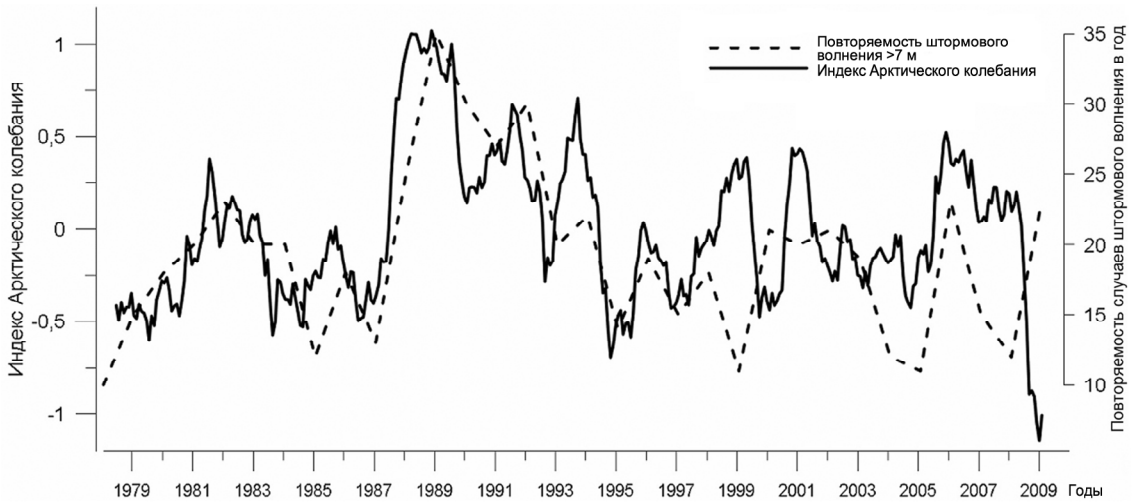

Рис. 5. Повторяемость штормового волнения высотой более 7 м и индекс Арктического колебания (скользящее среднее с окном 13 месяцев)

Fig. 5. Frequency of occurrence of storms with 7 m threshold and values of Arctic Oscillation index (moving average with the window of 13 months)

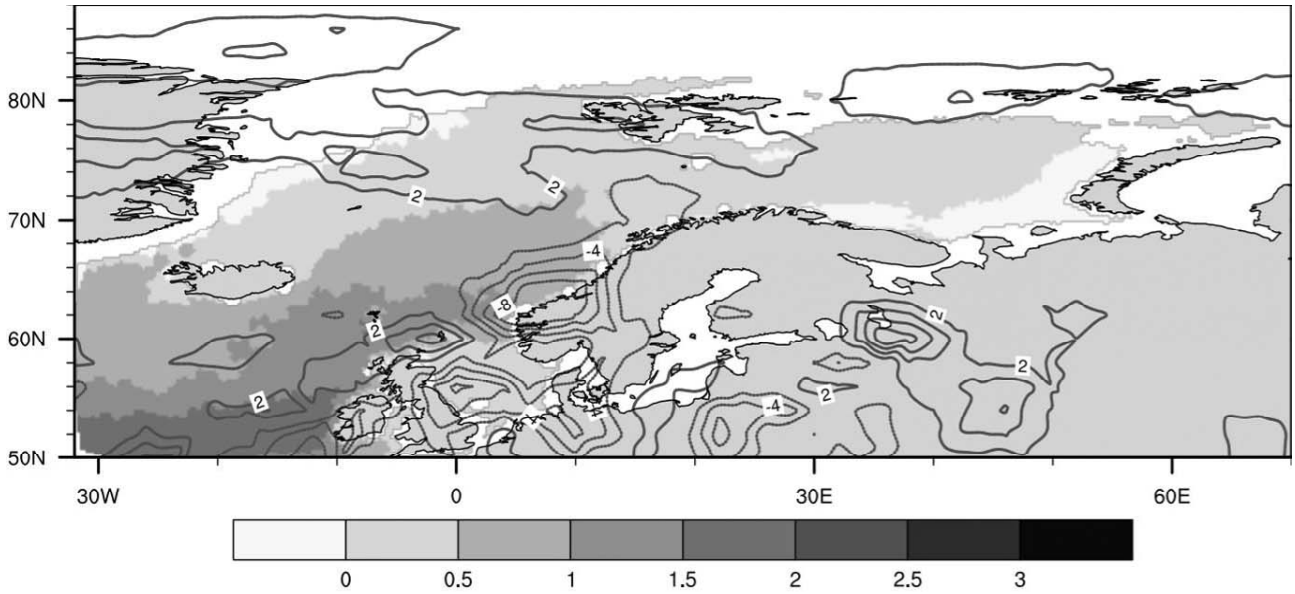

Рис. 6. Распределение по пространству линейных трендов повторяемости глубоких циклонов и штормового волнения за период с 1979 по 1990 гг. Изолинии – частота повторяемости центров глубоких циклонов (количество 6-часовых сроков за период декабрь–март), заливка – количество дней за период декабрь–март с высотой волн более 7 м

Fig. 6. Linear trends of the frequencies of deep cyclones and waves above 7 m during the period 1979–2010. Contour lines show the frequency of deep cyclone centers (number of 6-hour observation terms during December to March) and the shading shows the number of days with wave heights above 7 m threshold during the same period

цевом море является отдельной и весьма трудоемкой задачей, требующей дополнительного исследования.

Выводы:

– с помощью волновой модели WAVEWATCH III рассчитаны параметры ветрового волнения на акватории Баренцева моря для периода с 1979 по 2010 гг. Проведен анализ сезонной и межгодовой изменчивости повторяемости случаев штормового волнения в Баренцевом море;

– штормовое волнение с высотой волн более 4 м наблюдается в среднем 70–80 раз в год, более 5 м – 40–60 раз в год. Для случаев с высотой волн более 6 м максимальные значения повторяемости наблюдаются в 1990–1993 гг. Для случаев с высотой волн более 6 м выделяются следующие тренды: с 1979 по 1991 гг. наблюдалось увеличение повторяемости, с 1991 по 2002 гг. – уменьшение, а далее снова небольшое увеличение. В среднем за весь период с 1979 по 2010 гг. тенденций на однозначное увеличение количества случаев штормового волнения не отмечается. Межгодовая изменчивость повторяемости штормового волнения очень велика (для разных годов количество случаев может меняться в 2–3 раза);

– при сопоставлении повторяемости штормового волнения и индекса Арктического колебания обнаружено, что максимальный коэффициент корреляции наблюдается при осреднении индекса и повторяемости с декабря по март и составляет 0,6 для случаев с высотой волн более 7 м, и 0,57 если высота более 8 м;

– корреляция общего количества циклонов с повторяемостью случаев штормового волнения практически отсутствует, но связь наблюдается при сравнении повторяемости глубоких циклонов и случаев с высотой волн более 5 м. Максимальный коэффициент корреляции так же, как и в случае с Арктическим колебанием наблюдается при осреднении с декабря по март и составляет 0,67 для высоты волн более 7 м.

Благодарности. Моделирование волнения выполнялось М.Ю. Маркиной и Н.Д. Тилининой в рамках Госзадания (№ 0149-2018-0001). Оценки повторяемости случаев штормового волнения сделаны В.С. Архипкиным и С.А. Мысленковым при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-37-00038). Анализ траекторий циклонов осуществлен Н.Д. Тилининой при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-20112). Оценка качества воспроизведения высоты волн проводилась М.Ю. Маркиной при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 14.W03.31.0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, М.: Росгидромет, 2014. 1008 С.

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.

Кононова Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 133–162.

Луценко Э.И., Лагун В.Е. Полярные мезомасштабные циклоны в атмосфере над Баренцевым и Карским морями // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2(96). С. 76–89.

Маркина М.Ю., Гавриков А.В. Изменчивость ветрового волнения в северной Атлантике за зимы в период с 1979 по 2010 гг. по данным численного моделирования // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 346–352.

Мастрюков С.И. Имитационное моделирование временных рядов штормов и окон погоды по ветровым условиям // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 58–67.

Мысленков С.А., Архипкин В.С., Колтерманн К.П. Оценка высоты волн зыби в Баренцевом и Белом морях // Вестн. Моск. ун-та, Сер. 5: География. 2015. № 5. С. 59–66.

Мысленков С.А., Голубкин П.А., Заболотских Е.В. Оценка качества моделирования волнения в Баренцевом море при прохождении зимнего циклона // Вестн. Моск. ун-та. Сер 5: География. 2016. № 6. С. 26–32.

Мысленков С.А., Платонов В.С., Торопов П.А., Шестакова А.А. Моделирование штормового волнения в Баренцевом море // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2015. № 6. С. 65–75.

Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях. Федер. служба по гидромет. и мониторингу окр. среды (Росгидромет) / 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.

Суркова Г.В., Крылов А.А. Синоптические ситуации, способствующие формированию экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом море // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2016. № 6. С. 18–25.

Шалина Е.В. Сокращение ледяного покрова Арктики по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования // Современные проблемы изучения Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 328–336.

Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures // J. Assoc. Comput. Mach. 1970. V. 17. P. 589–600.

Dee D.P., Uppalaa S.M., Simmonsa A.J., Coauthors The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597.

Huth R., Beck C., Philipp A. et al. Classifications of Atmospheric Circulation Patterns Recent Advances and Applications. Trends and Directions in Climate Research // Ann. N.Y. Acad. Sci. 2008. V. 1146. P. 105–152. doi: 10.1196/annals.1446.019

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013.

Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., Markina M., Surkova G., Krylov A., Dobrolyubov S., Zilitinkevich S., Koltermann P. Long-term statistics of storms in the Baltic, Barents andWhite Seas and their future climate projections // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11. № 1. P. 93–112.

Liu Q., Babanin A., Zieger S., Young I., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters // J. Climate. 2016. V. 29(22). P. 7957–7975.

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. V. 116. C05019.

Rusu L., Ponce de Leon S., Guedes Soares C. Numerical modelling of the North Atlantic storms affecting the West Iberian coast // Maritime Technology and Engineering – Guedes Soares & Santos. Taylor & Francis Group, London, 2015. ISBN 978-1-138-02727-5

Saha S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis // Bul. of the American Meteorological Society. 2010. V. 91. № 8. P. 1015–1057.

Smirnova J., Golubkin P. Comparing polar lows in atmospheric reanalyses: Arctic System Reanalysis versus ERA-Interim // Mon. Weath. Rev. 2017. V. 145. № 6. P. 2375–2383.

Stopa J., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F. Wave climate in the Arctic 1992–2014: seasonality and trends // Cryosphere. 2016. V. 10(4). P. 1605–1629.

Tilinina N., Gulev S., Rudeva I., Koltermann P. Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses // J. Clim. 2013. V. 26. P. 6419–6438.

Tilinina N., Gulev S.K., Bromwich D. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic System reanalysis // Geophys. Res. Lett. 2014. № 43. P. 1766–1772.

Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III Version 4.18. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical note. 2014. 282 p.

Wang X.L., Swail V.R. Changes of Extreme Wave Heights in Northern Hemisphere Oceans and Related Atmospheric Circulation Regimes // J. Climate. 2001. V. 14. P. 2204–2221. doi:10.1175/1520-0442(2001)014<2204:coewhi>2.0.co;2

Zolina O., Gulev S. Improving the accuracy of mapping cyclone numbers and frequencies // Mon. Wea. Rev. 2002. V. 130. P. 748–759.

Поступила в редакцию 26.01.2018
После доработки 15.04.2018
Принята к публикации 06.12.2018

S.A. Myslenkov[1], M.Yu. Markina[2], V.S. Arkhipkin[3], N.D. Tilinina[4]

FREQUENCY OF STORMS IN THE BARENTS SEA UNDER MODERN CLIMATE CONDITIONS

Estimates of the frequency of storm waves in the Barents Sea are given. The results were obtained on the basis of data from the simulation of wind waves during 1979 to 2010 using the WAVEWATCH III wave model on the nonstructural grid. Number of episodes with various heights of waves (from 4 to 10 m) is calculated for every month in the Barents Sea. The assessment of inter-annual variability of the frequency of storm waves is carried out.

There is no significant linear trend for the frequency of storm waves in the Barents Sea for 1979–2010 period. Episodes with wave height more than 6 m were more frequent in 1979–1991, less frequent in 1991–2002 and more frequent again after 2003. Maximum number of such waves is during 1990 to 1993. Inter-annual variability of storm waves is very high (for different years the number of storm waves episodes can vary by 2 to 3 times). The coefficient of correlation between the index of the Arctic fluctuation and the frequency of waves more than 7 m high is 0,6. The coefficient of correlation of the number of deep cyclones with the frequency of waves more than 7 m high makes 0,67.

Key words: storm intensity, wind waves, wave simulation, WAVEWATCH III

Acknowledgments. Modeling of waves was performed by M.Yu. Markina and N.D. Tikinina within the State task (№ 0149-2018-0001). Frequencies of storm waves were estimated by V.A. Arkhipkin and S.A. Myslenkov with financial support from the Russian Science Foundation (project № 14-37-00038). The cyclone trajectories were analyzed by N.D. Tilinina with financial support from the Russian Science Foundation (project № 17-77-20112). The quality of wave height representation was evaluated by M.Yu. Markina with financial support from the RF Ministry of Education and Science (project № 14.W03.31.0006).

REFERENCES

Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures // J. Assoc. Comput. 1970. V. 17. P. 589–600.

Dee D.P. et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597.

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. № 7. S. 87–94. (In Russian)

Huth R., Beck C., Philipp A. et al. Classifications of Atmospheric Circulation Patterns Recent Advances and Applications. Trends and Directions in Climate Research // Ann. N.Y. Acad. Sci. 2008. V. 1146. P. 105–152. doi: 10.1196/annals.1446.019

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013.

Kononova N.K. Izmenenija cirkuljacii atmosfery severnogo polusharija v XX–XXI stoletijah i ih posledstvija dlja klimata [Changes of atmospheric circulation of the Northern Hemisphere in the 20th–21st centuries and their climatice consequences] // Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija. 2015. № 1. S. 133–162. (In Russian)

Liu Q., Babanin A., Zieger S., Young I., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters // J. Climate. 2016. V. 29(22). P. 7957–7975.

Lutsenko E.I., Lagun V.E. Polyarnye mezomasshtabnye tsyklony v atmosfere nad Barentsevym i Karskim moryami [Polar mesoscale cyclones in the atmosphere over the Barents and Kara seas] // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2013. № 2(96). P. 76–89.(In Russian)

Markina M.Ju., Gavrikov A.V. Izmenchivost' vetrovogo volnenija v severnoj Atlantike za zimy v period s 1979 po 2010 gg. po dannym chislennogo modelirovanija [Wave climate variability in the North Atlantic during winter periods of 1979 to 2010 by the data of numerical modeling] // Okeanologija. 2016. T. 56. № 3. S. 346–352. (In Russian)

Mastrjukov S.I. Imitacionnoe modelirovanie vremennyh rjadov shtormov i okon pogody po vetrovym uslovijam [Simulation of time series of storms and weather windows basing on wind conditions data] // Meteorologija i gidrologija. 2013. № 4. S. 58–67. (In Russian)

Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., Markina M., Surkova G., Krylov A., Dobrolyubov S., Zilitinkevich S., Koltermann P. Long-term statistics of storms in the Baltic,

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Research Scientist; P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS; Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, PhD. in Physics and Mathematics; *e-mail*: stasocean@gmail.com

[2] P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, trainee researcher; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, post-graduate student; *e-mail*: markina@sail.msk.ru

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: victor.arkhipkin@gmail.com

[4] P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Research Scientist, PhD. in Physics and Mathematics; *e-mail*: tilinina@sail.msk.ru

Barents and White Seas and their future climate projections // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11. № 1. P. 93–112.

Myslenkov S.A. Golubkin P.A., Zabolotskih E.V. Ocenka kachestva modelirovanija volnenija v Barencevom more pri prohozhdenii zimnego ciklona [Evaluation of the quality of wave modeling under winter cyclone conditions for the Barents Sea] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija. 2016. № 6. S. 26–32 (In Russian)

Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S., Koltermann P.K. Ocenka vysoty voln zybi v Barencevom i Belom morjah [Estimation of the heights of swell in the White and Barents seas] // Vestnik Mosk. uni. Ser. 5. Geografija. 2015. № 5. S. 59–66. (In Russian)

Myslenkov S.A., Platonov V.S., Toropov P.A., Shestakova A.A. Modelirovanie shtormovogo volnenija v Barencevom more [Simulation of storm waves in the Barents Sea] // Vestnik Mosk. uni. Ser. 5. Geografija. 2015. № 6. S. 65–75. (In Russian)

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. V. 116. C05019.

Rezhim, diagnoz i prognoz vetrovogo volnenija v okeanah i morjah: Nauch.-metod. posobie [Climate, analysis and forecast of wind waves in the oceans and seas] / Pod red. E.S. Nesterova. M. : Issled. gruppa «Social'nye nauki», 2013. 295 s. (In Russian)

Rusu L., Ponce de Leon S., Guedes Soares C. Numerical modelling of the North Atlantic storms affecting the West Iberian coast // Maritime Technology and Engineering – Guedes Soares & Santos. Taylor & Francis Group, London, 2015. ISBN 978-1-138-02727-5

Saha S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. V. 91. № 8. P. 1015–1057.

Shalina E.V. Sokrashhenie ledjanogo pokrova Arktiki po dannym sputnikovogo passivnogo mikrovolnovogo zondirovanija [Arctic sea ice retreat by the data of satellite passive microwave observations] // Sovremennye problemy izuchenija Zemli iz kosmosa. 2013. T. 10. № 1. S. 328–336. (In Russian)

Smirnova J., Golubkin P. Comparing polar lows in atmospheric reanalyses: Arctic System Reanalysis versus ERA-Interim // Mon. Weath. Rev. 2017. V. 145. № 6. P. 2375–2383.

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

Stopa J., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F. Wave climate in the Arctic 1992–2014: seasonality and trends // Cryosphere. 2016. V. 10(4). P. 1605–1629.

Surkova G.V., Krylov A.A. Sinopticheskie situacii, sposobstvujushhie formirovaniju jekstremal'nyh znachenij skorosti vetra v Barencevom more [Synoptic situations favoring the extreme wind velocities in the Barents Sea] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija. 2016. № 6. S. 18–25. (In Russian)

Tilinina N., Gulev S.K., Bromwich D. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic System reanalysis // Geophys. Res. Lett. 2014. № 43. P. 1766–1772.

Tilinina N., Gulev S.K., Rudeva I., Koltermann P. Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses // J. Clim. 2013. V. 26. P. 6419–6438.

Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III Version 4.18. NOAA/NWS/NCEP/MMAB // Technical note. 2014. 282 p.

Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii [Second assessment report of Rosgidromet about the climate change and its consequences for the territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. P. 1008. (In Russian)

Wang X.L., Swail V.R. Changes of Extreme Wave Heights in Northern Hemisphere Oceans and Related Atmospheric Circulation Regimes // J. Climate. 2001. V. 14. P. 2204–2221. doi:10.1175/1520-0442(2001)014<2204:coewhi>2.0.co;2

Zolina O., Gulev S.K. Improving the accuracy of mapping cyclone numbers and frequencies // Mon. Wea. Rev. 2002. V. 130. P. 748–759.

Received 26.01.2018
Revised 15.04. 2018
Accepted 06.12.2018