

ОКЕАНОЛОГИЯ OCEANOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-6-20>

УДК 551.466.3



Пространственная изменчивость трендов значительных высот волн в Карском море

Е.Е. Круглова^{1,2}✉, С.А. Мысленков¹, В.С. Платонов¹

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

² *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

✉ kruglovaee@my.msu.ru

ID ЕЕК, 0000-0003-2386-4787; SAM, 0000-0002-7700-4398; ВСП, 0000-0002-7256-1451

Аннотация. В статье проведен пространственный анализ трендов средних, максимальных за год, а также 95-го перцентиля высот значимых волн в Карском море. Анализ трендов выполнен на основе результатов моделирования за период с 1979 по 2021 г. В качестве исходных данных использовались данные о ветре и концентрации льда из реанализов NCEP/CFRS/CFsv2. Оценка трендов высот волн проводилась как для всего периода, так и для безледного. На всей акватории моря величины трендов для среднегодовых значений положительные. Максимальная величина характерна для границы с Баренцевым морем и едва превышает 0,2 м/10 лет. Для безледного периода максимальные величины трендов характерны и для среднегодовых, и для 95-го перцентиля высот волн в северной части моря (максимальные величины трендов ~0,25 м/10 лет и ~0,5 м/10 лет соответственно).

Ключевые слова: ветровые волны, волновая модель WAVEWATCH III, Карское море, моделирование волнения, скорость ветра, тренды

Для цитирования: Круглова Е.Е., Мысленков С.А., Платонов В.С. Пространственная изменчивость трендов значительных высот волн в Карском море. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):6–20. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-6-20>

Поступила 03.12.2023

После переработки 27.02.2024

Принята 04.03.2024

Spatial trend analysis of significant wave heights in the Kara Sea

Elizaveta E. Kruglova^{1,2}✉, Stanislav A. Myslenkov¹, Vladimir S. Platonov¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

² *P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

✉ kruglovaee@my.msu.ru

ID ЕЕК, 0000-0003-2386-4787; SAM, 0000-0002-7700-4398; VSP, 0000-0002-7256-1451

Abstract. Over the past decades, the extent of sea ice in the Arctic, including the Kara Sea, has been diminishing. This phenomenon has a direct impact on wind waves as the increased expansion of ice-free water influences wave height. Furthermore, alterations in the ice cover also lead to modifications in atmospheric circulation, necessitating a concurrent analysis of wind and waves to refine the understanding of their interrelationships. In this study, wave modeling data were employed using the WAVEWATCH III model and NCEP/CFSR/CFSv2 reanalyses. Calculations were performed on a non-structural computational grid. The grid covers the Barents and Kara Seas, as well as the entire northern part of the Atlantic Ocean. The spatial resolution varies from ~ 700 m for the coastal zone of the Kara Sea, to ~ 20 km in the open part of the Kara Sea, covering the period from January 1, 1979 to December 31, 2021. Subsequently, average significant wave heights (SWH), maximum SWH, and the 95th percentile of SWH were computed for each grid node on both monthly and yearly basis. The annual values were analyzed for trends and their significance. Calculations were conducted for both the entire period and ice-free period. Positive trends in annual mean values were observed throughout the sea, with the maximum trend occurring near the boundary with the Barents Sea, barely exceeding 0.2 m/10 years. The northern and northeastern parts of the sea were characterized by significant positive trends of the maximum SWH values. Maximum trend values for the 95th percentile of SWH were also evident in the northern part of the Kara Sea. For the ice-free period, maximum trend values were notable for both the annual mean and the 95th percentile of SWH in the northern part of the sea (maximum trend values are approximately 0.25 m/10 years and 0.5 m/10 years, respectively). Significant positive trends in the annual mean SWH were characteristic of the southern part of the sea, while the largest and significant trends for maximum wave heights were observed in the northeast. The assessment of the contribution of wind and ice regimes to the variability of wind waves remains a subject of discussion.

Keywords: Kara Sea, trends, storm activity, wave modeling, wind speed, WAVEWATCH III, wind waves

For citation: Kruglova E.E., Myslenkov S.A., Platonov V.S. Spatial trend analysis of significant wave heights in the Kara Sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):6–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-6-20>

Received 03.12.2023

Revised 27.02.2024

Accepted 04.03.2024

Введение

Арктический регион особенно подвержен климатическим изменениям, в числе которых следует отметить уменьшение площади морских льдов [1, 2]. Это приводит к расширению области открытой водной поверхности [2–4]. Подобная тенденция оказывает существенное воздействие на характер ветрового волнения в Арктике, в том числе и в Карском море.

Увеличение высоты волн в Чукотском, Беринговом морях и море Бофорта не может быть объяснено только изменениями в скорости ветра [5]. Существует связь между увеличением площади свободной ото льда водной поверхности и увеличением средней высоты волн в Чукотском море и море Бофорта [6]. С другой стороны, в арктических морях была обнаружена высокая корреляция между усилением экстремальных скоростей ветра и увеличением высоты экстремальных волн [7]. Довольно трудно разделить вклад изменений скорости ветра и площади льда в изменения параметров ветрового волнения из-за существующих механизмов обратной связи этих характеристик. Увеличение площади открытой воды, безусловно, влияет на развитие волнения (увеличивается длина разгона), однако на открытой воде меняется шероховатость подстилающей поверхности и начинается более интенсивный турбулентный обмен теплом, что приводит к изменениям в поле ветра над данной акваторией, что в свою очередь повлияет на ветровое волнение.

Среднее увеличение годового максимума высот значительных волн на основе сценария RCP8.5 в рамках проекта CMIP5 [8] во многих районах Арктики составляет

до 3 см/год относительно условий современного климата (период 1986–2005 гг.). В сентябре процент экстремальных явлений, вызванных циклонами, за последние четыре десятилетия увеличился примерно с 50 % до почти 80 % [9]. По данным реанализа ERA-Interim показано увеличение годовых максимумов значительных высот волн, что в значительной степени коррелирует с увеличением максимальной скорости ветра и в меньшей степени с площадью открытой воды [10].

Существуют различные проблемы, связанные с возможным полным освобождением Арктики ото льда, с точки зрения моделирования (например схемы эйлеровой адвекции, включая ограничения Куранта–Фридрихса–Леви, сингулярность на полюсе и неверное скалярное допущение для векторных компонентов) [11].

Справочные данные по режиму ветра и волнения Карского моря содержат методику расчетов и сведения, в числе которых карты экстремальных и оперативных статистик ветра и волн [12]. На основе моделирования волнения показан рост штормовой активности в Карском море за последние 39 лет, обусловленный в первую очередь увеличением продолжительности безледного периода [13]. Также на основе моделирования проводится сезонная оценка роста количества штормов в Карском море и сделан вывод о наибольшем вкладе периода октябрь–март в межгодовую изменчивость [14]. Средние значения периодов и значительных высот волн остаются стабильными, в то время как экстремальные значения демонстрируют заметные межгодовые колебания [15]. Связь между количеством штормов и крупномасштабными индексами атмосферной циркуляции в Карском море не обнаружена [16].

Однако на данный момент для Карского моря отсутствует подробный анализ трендов высот волн по пространству. Актуальной проблемой является одновременная оценка тенденций в изменчивости скорости ветра, площади морских льдов и характеристик ветрового волнения для более полного понимания взаимосвязи протекающих процессов.

Цель данной работы — провести пространственный анализ трендов средне-годовых, максимальных, а также 95-го перцентиля высот значимых волн в Карском море. Анализ трендов выполнен на основе результатов моделирования за период с 1979 по 2021 г.

Данные и методы

Для анализа ветрового волнения использовалась база данных, полученная на основе модельных расчетов, из работы [17]. При создании базы данных использовалась волновая модель WAVEWATCH III 6.07, схема генерации волн ST6 [18]. Для учета влияния льда была использована схема IC0, в которой при концентрации льда от 0 до 0,5 (концентрация задается в модель в долях от 0 до 1) узел сетки считается покрытым льдом и включается экспоненциальное затухание волновой энергии с поправкой на концентрацию льда в данном узле, при концентрации более 0,5 волновая энергия обнуляется.

При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979–2010) с пространственным разрешением $\sim 0,3^\circ$ и реанализа NCEP/CFSv2 (2011–2021) с разрешением $\sim 0,2^\circ$. Расчеты проводились с использованием неструктурной сетки, состоящей из 37729 узлов (рис. 1). Сетка охватывает Баренцево и Карское моря, а также всю северную часть Атлантического океана. Пространственное разрешение варьируется от ~ 700 м для прибрежной зоны Карского моря до ~ 20 км в открытой части Карского

моря. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений ($\Delta\theta = 10^\circ$), частотный диапазон σ — 36 интервалов от 0,03 до 0,843 Гц [13]. Для более подробного анализа были выбраны 4 точки, расположенные в разных частях моря. Выбор точек обусловлен тем, что максимумы осредненной за весь период высоты волн локализованы на границе между Карским и Баренцевым морями, а также восточнее Карских Ворот (точки 1 и 4). Точка 3 интересна своим расположением в зоне, где наблюдаются максимальные изменения в ледовитости, а также наибольшие величины трендов для максимальной высоты волны (рис. 2в). Точка 2 была выбрана из-за расположения в центральной части акватории Карского моря, где влияние Баренцева моря отсутствует, а тенденции изменения ледовитости менее выражены.

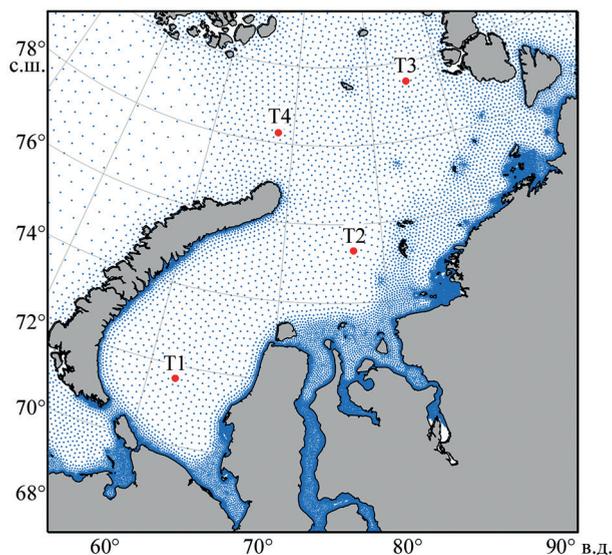


Рис. 1. Узлы неструктурированной вычислительной сетки. T1–T4 — точки, выбранные для подробного анализа данных

Fig. 1. Unstructured computational grid. T1–T4 are the points selected for data analysis.

Оценки качества волновой модели, полученные на основе сравнения с данными прямых измерений и спутников Cryosat, Saral, Sentinel, представлены в [13–17].

Необходимо отметить, что, согласно схеме учета льда в модели, узел с концентрацией льда более 0,5 считается покрытым льдом и высота волны составляет 0 м. В связи с чем для каждого узла сетки вычислялась средняя высота значительных волн (при наличии льда высота волны, равная 0 м, учитывалась при вычислении среднего), максимальная высота значительных волн и 95-й перцентиль. А также вычисления проводились отдельно для безледного периода (когда концентрации льда в узле составляла более 0,5, значение высоты волны, равное 0 м, не учитывалось при вычислении среднего).

Анализ трендов основан на величинах средних, максимальных и 95-го перцентиля значительных высот волн, приведенных к ежегодным данным (длина ряда 43 значения, т. е. годовые значения, с 1979 по 2021 г.). Величина тренда и оценка его значимости получены для каждого узла вычислительной сетки. В качестве тренда использовалась модель линейной регрессии. Оценка значимости проводилась пу-

тем проверки адекватности модели по критерию Фишера и оценки коэффициентов регрессии на значимость по критерию Стьюдента. При вычислении критерия Стьюдента и критерия Фишера использовался уровень значимости 5 %.

Также был проведен подробный анализ трендов в 4 точках, расположенных в разных частях Карского моря (см. рис. 1). Анализ величин трендов в этих точках проведен отдельно по месяцам года. Результаты приведены для января, апреля, июля и октября. Выбор именно этих месяцев обусловлен наиболее контрастирующей изменчивостью режимов волнения.

Данные реанализа NCEP/CFSR/CFSv2 использовались для оценки трендов среднегодовых значений и 95-го перцентиля скорости ветра. Значимость трендов по ветру оценивалась по t-критерию Стьюдента (используемый уровень значимости 5 %).

Результаты

Пространственный анализ распределения величин трендов

На основе среднегодовых значений, максимальных и 95-го перцентиля высот волн были получены карты величин линейных трендов в каждом узле сетки для всего периода (рис. 2) и для безледного периода (рис. 3). Черными точками показаны

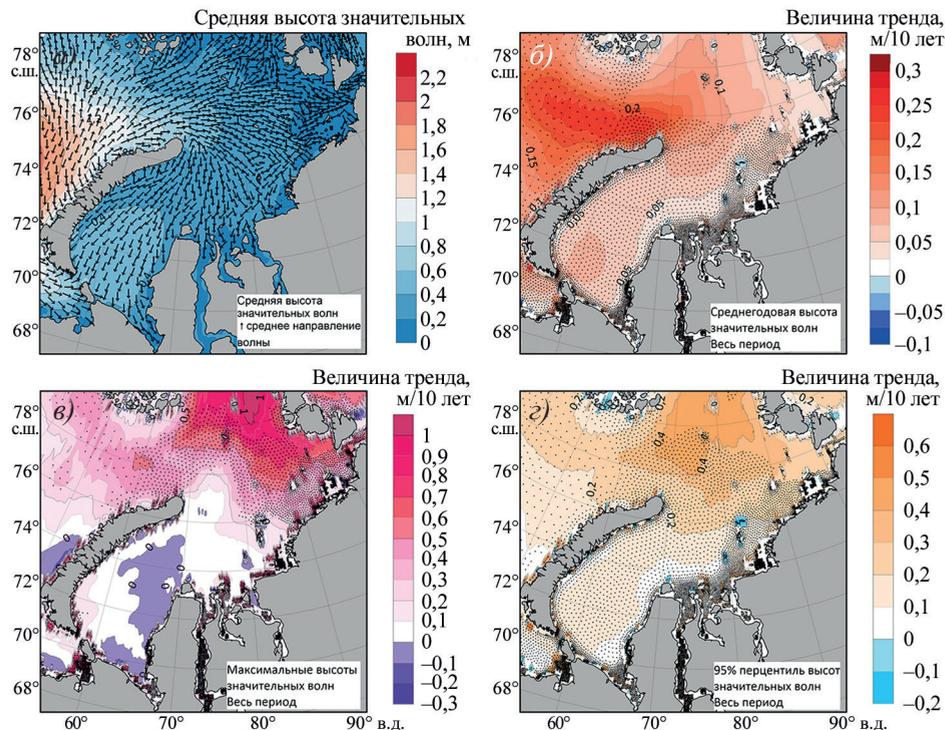


Рис. 2. Карты распределения средней высоты и направления волны (а) и величин трендов для среднегодовых (б), максимальных (в), 95-го перцентиля (г) значительных высот волн за весь период. Черными точками показаны узлы сетки, в которых тренды оказались значимы

Fig. 2. Maps of the distribution of the average wave height and direction (a), trend values for the annual (b), maximum (c), and 95th percentile (d) of significant wave heights for the entire period are shown. The black dots indicate the grid nodes where significant trends were found

узлы сетки, для которых тренд оказался значим. Максимальная годовая высота волны оценивалась только один раз, так как значения для всего периода и для безледного имеют одни и те же максимумы в значениях.

На рис. 2а видно, что максимальные средние высоты волн более ~0,55 м наблюдаются на границе Карского и Баренцева морей, а также в районе Карских Ворот. Стрелочками на рис. 2а обозначены средние направления волн (указано направление движения волны). Для более корректной визуализации на карту не наносились направления на расстоянии менее 15 км от берега. На всей акватории моря величины трендов среднегодовых высот волн положительные (см. рис. 2б). Максимальная величина наблюдается на границе с Баренцевым морем и составляет до 0,2 м/10 лет. Тренды статистически значимы для всего моря, кроме области севернее 76–78° с. ш. Для максимальной высоты волн характерны большие величины трендов (до 1 м/10 лет) на самом севере и нулевые или слабые отрицательные тренды в центральной части Карского моря. Значимые тренды локализованы в северной и северо-восточной части моря. Максимальные величины трендов для 95-го перцентиля высот волн составляют до 0,4 м/10 лет и расположены в северной части Карского моря (см. рис. 2с). Значимые тренды определяются практически повсеместно, кроме области севернее 77–78° с. ш. Так как многолетняя кромка льдов смещается на север [1–4], следовательно, ветровое волнение развивается там, где ранее круглый год был лед, что объясняет тренды для максимальной высоты волн и 95-го перцентиля.

Для среднегодовых значений высот волн в безледный период характерно иное пространственное распределение величин трендов (рис. 3а). Видно, что максимальные величины трендов локализованы в северной части моря и достигают 0,2 м/10 лет. Примечательно, что в центральной части Карского моря положительные тренды практически отсутствуют. Так как здесь при анализе не учитываются нулевые высоты волн при наличии льда, то этот показатель можно считать более объективным, чем оценки трендов на рис. 2б. Тренды для 95-го перцентиля значимых высот волн

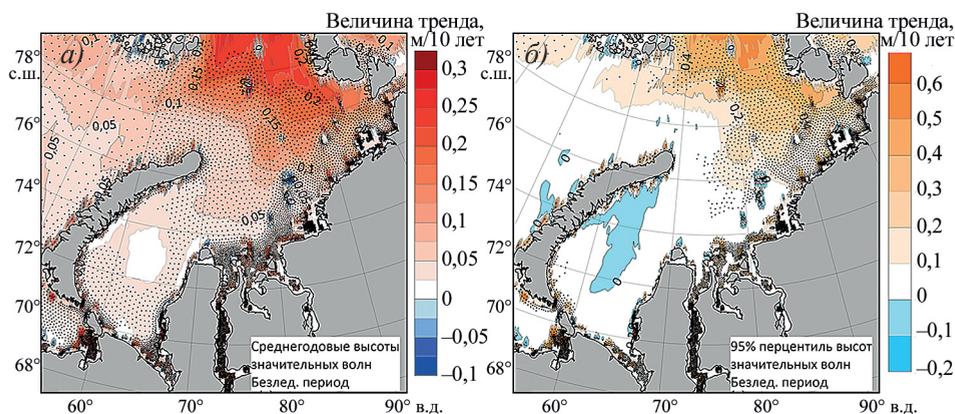


Рис. 3. Карты распределения величин трендов для среднегодовых (а) и 95-го перцентиля (б) значительных высот волн в безледный период. Черными точками показаны узлы сетки, в которых тренды оказались значимы

Fig. 3. Maps of the distribution of significant wave height trend values for average annual (a) and 95th percentile (b) significant wave heights during the ice-free period. The black dots indicate grid nodes where significant trends were found

в безледный период нулевые или слабые отрицательные на большей части акватории Карского моря. Положительные значимые тренды для 95-го перцентиля наблюдаются только в северной и северо-восточной части моря (см. рис. 3б). Именно в этих областях в 1980–1990-е гг. практически весь год присутствовал морской лед, а в последние годы открытая вода наблюдается все чаще. Таким образом, рост волн за счет увеличения длины разгона при уменьшении площади морского льда в центральной, южной и юго-восточной частях Карского моря практически отсутствует. Эта тенденция наблюдается только на самом севере Карского моря, и связано это скорее с отсутствием открытой воды в некоторые годы и устойчивым (хоть и непродолжительным) безледным периодом с начала 2000-х гг. Более наглядно это показано ниже при анализе результатов в точках.

Как известно, ветровое волнение вызывается прежде всего энергией ветра, а поля морского льда являются только ограничением для распространения ветровых волн. Следовательно, тренды для ветровых волн необходимо анализировать совместно с трендами для скорости ветра.

На рис. 4а видно, что положительные тренды для среднегодовой скорости ветра значимы практически для всей акватории моря, а для 95-го перцентиля значимы для западной и северо-западной частей моря. Наибольшие величины трендов как для средней скорости ветра, так и для 95-го перцентиля наблюдаются в Баренцевом море, а также на границе Баренцева и Карского морей.

Следовательно, положительные тренды для средней высоты волн в безледный период как в Баренцевом, так и в Карском море (см. рис. 3а) могут быть связаны с увеличением средних скоростей ветра (рис. 4б). Тренды для максимальных высот волн (см. рис. 2в) и для 95-го перцентиля высот волн в безледный период (см. рис. 3б) в Карском море севернее 76° с. ш., по всей видимости, связаны с изменением ледовой обстановки, так как сходства с распределением величин трендов скорости ветра практически не наблюдается.

В центральной части Карского моря тренды для средней скорости ветра и для 95-го перцентиля положительные, продолжительность безледного периода увеличивается, однако роста волн не наблюдается (см. рис. 3).

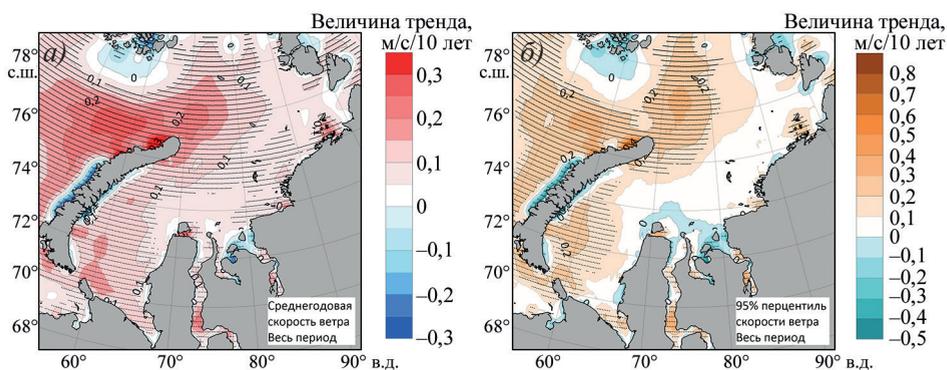


Рис. 4. Карты распределения величин трендов для среднегодовых (а) и 95-го перцентиля (б) скоростей ветра. Черными точками показаны узлы сетки, в которых тренды оказались значимы

Fig. 4. Maps of distribution of trend values of average annual (a), and 95th percentile wind speeds (b) The black dots indicate the grid nodes where trends were significant

Полученные тренды для скорости ветра хорошо согласуются с аналогичными результатами в работах [20, 21], где анализ выполнялся на основе других данных по ветру (ERA-Interim, ERA5). Реанализ MERRA2, представленный в [20], имеет другое распределение как знака тренда, так и его значимости для Карского моря. Следует также отметить, что значимых трендов высот волн в Карском море в [20] не найдено, что может объясняться другой конфигурацией волновой модели и другими входными данными по ветру и льду.

Таким образом, влияние сокращения площади льда на тренды ветрового волнения подтверждается только для северной части Карского моря между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Северная Земля. Тренды для средней высоты волн в безледный период на границе Карского и Баренцева морей вполне могут объясняться положительными трендами в скорости ветра.

Анализ средних, максимальной и 95-го перцентиля высот волн в точках по годам

На рис. 5а показаны высоты средних, максимальных и значительных волн 95-го перцентиля в точке Т1 и линии трендов. Для среднегодовых высот волн тренды значимы и для всего периода, и для безледного. Наибольшая величина тренда наблюдается при оценке среднегодовых высот волн за весь период — каждые 10 лет высота волны становится больше на 0,08 м. Также значимым является тренд для 95-го перцентиля (за весь период), его величина 0,1 м/10 лет. Остальные тренды оказались статистически незначимыми. Отрицательный тренд для 95-го перцентиля высот волн в данной точке в безледный период статистически незначим.

Для Т2 тренд для максимальных годовых значений тоже оказался незначимым. Величины трендов при оценке всего периода больше, чем для безледного и составляют 0,07 м/10 лет и 0,2 м/10 лет (для среднегодовых и 95-го перцентиля высот волн соответственно).

Интереснее ситуация для Т3 (см. рис. 5б). Пропуски в значениях характерны для лет, когда в данной точке круглый год был лед. Уже основываясь на этом, можно отметить, что начиная с 2004 г. узел уже никогда не был покрыт льдом в течение всего года. Здесь положительные значимые тренды характерны для оценки в безледный период. Средняя высота волны увеличивается каждые 10 лет на 0,2 м, а перцентиль за тот же период времени возрастает на 0,4 м. Остальные тренды оказались статистически незначимыми. Это является дополнительной иллюстрацией к картам трендов на рис. 3, где максимальные величины трендов расположены в районе Т3.

Следовательно, большие значимые величины трендов для высоты волн в безледный период для северо-востока Карского моря (см. рис. 3б) можно объяснить не увеличением длины разгона и высоты волн, а просто периодическим отсутствием волн до 2004 г.

Для Т4, находящейся на границе между Карским и Баренцевым морями, при оценке за весь период значимые положительные тренды характерны для максимальных годовых значений и высот волн 95-го перцентиля (0,4 м/10 лет и 0,3 м/10 лет). Тренд для среднегодовых волн значим только при оценке за безледный период. Можно предположить, что тренд экстремальных волн в этом районе моря определяется в первую очередь трендами ветра (см. рис. 4).

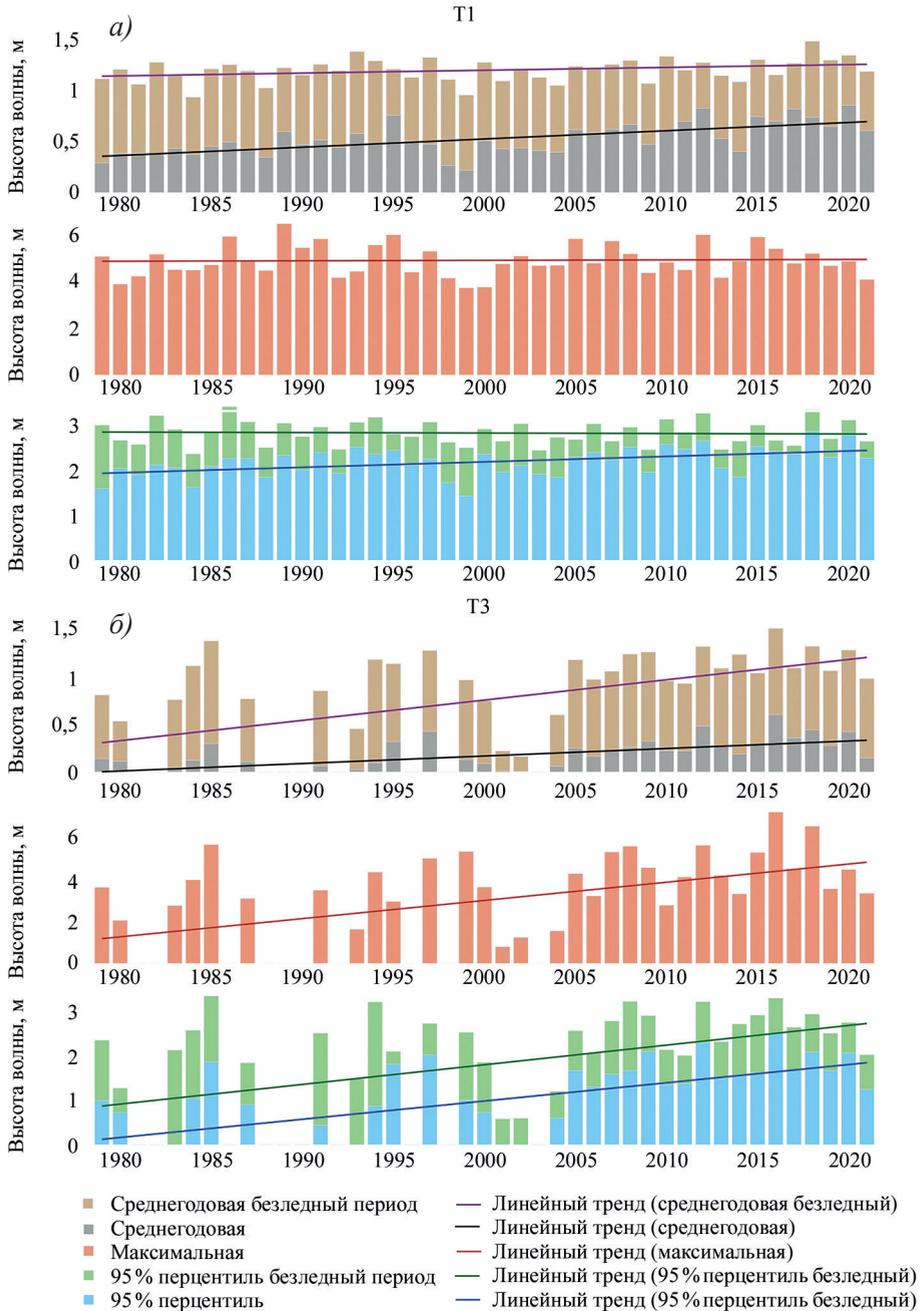


Рис. 5. Многолетний ход среднегодовых, максимальных годовых и 95 % перцентилей высот волн в T1 (а) и T3 (б)

Fig. 5. Time series of the average annual, maximum annual and 95th percentile of the wave heights at T1 (a) and T3 (b) points

Анализ средней, максимальной и 95-го перцентиля высот волн в точках по месяцам

Для Т1 характерно, что с января по май большую часть рассматриваемого периода узел покрыт льдом. При анализе средних, максимальных и 95-го перцентиля высот волн в Т1 значимые положительные тренды были найдены для июля (при оценке за весь период) с величинами трендов 0,12 м/10 лет, 0,24 м/10 лет и 0,19 м/10 лет соответственно и для ноября (как за весь период, так и для безледного). Наибольшие величины трендов в ноябре характерны для максимальных высот волн (0,42 м/10 лет) и для 95-го перцентиля в безледный период (0,35 м/10 лет). Отрицательные незначимые тренды были найдены для среднегодовой и 95-го перцентиля (в апреле) и для перцентиля и максимальных значений (в августе–октябре).

В период с декабря по апрель в Т2 наблюдается отсутствие волнения (исключая декабрь 2020 г., когда в точке еще не успел образоваться лед и волнение достигло ~4 м в максимуме). При оценке для всего периода величины трендов оказались больше, чем при оценке за безледный. Положительные значимые тренды найдены в июле, августе и октябре. Максимальная величина тренда средних за весь период 0,29 м/10 лет (октябрь), за безледный 0,12 м/10 лет (июль), максимальных — 0,48 м/10 лет (июль). Величины значимых трендов 95-го перцентиля высот волн изменяются от 0,23 до 0,36 м/10 лет в зависимости от периода и месяца. Есть незначимый отрицательный тренд для максимальных значений в сентябре.

В Т3 период, когда узел покрыт льдом, больше в сравнении с другими выбранными узлами (с ноября по май). Однако с 2009 г. наблюдалось 5 лет, когда в ноябре было волнение (с максимумом в ~7 м в 2016 г.). Для периода июнь–сентябрь характерно наличие положительных трендов. Исключения составляют среднее и 95-го перцентиля высот волн для всего периода в июне, когда тренды слабо отрицательны. Положительные значимые тренды характерны для максимальных и 95-го перцентиля за весь период (0,67 и 0,48 м/10 лет) и для средних и 95-го перцентиля за безледный период (0,24 и 0,47 м/10 лет) в сентябре.

Значимые положительные тренды в Т4 характерны для июня, августа и октября. Максимальная величина тренда найдена для максимальных значений в июне — каждые 10 лет высота волн увеличивается на 0,8 м.

На рис. 6 представлены величины трендов в каждый отдельный месяц за весь период для средней высоты волны. Видно, что для Т2 и Т3 характерно отсутствие трендов с января по май–июнь, что связано с ледовым режимом данных областей. На границе же с Баренцевым морем (Т4) тренды во все месяцы положительные, с максимальными в ноябре. В точке в южной части моря (Т1) максимальные величины трендов характерны для декабря, что может быть обусловлено более поздним ледообразованием.

Полученные в ходе сезонного анализа данные в целом согласуются с [21], где показано увеличение экстремальных волн 100-летней повторяемости в разные месяцы, однако величина изменений другая, вследствие разного методического подхода и разного исследуемого периода. Также полученные результаты согласуются с [22–24], где приводятся оценки изменчивости площади морского льда, районы наибольшей изменчивости (например, северо-восточная часть Карского моря) и более поздние периоды ледообразования.

Дискуссионным вопросом является оценка величины вклада изменчивости ветра и льда в тренды ветровых волн, что требует дальнейшей работы с исполь-

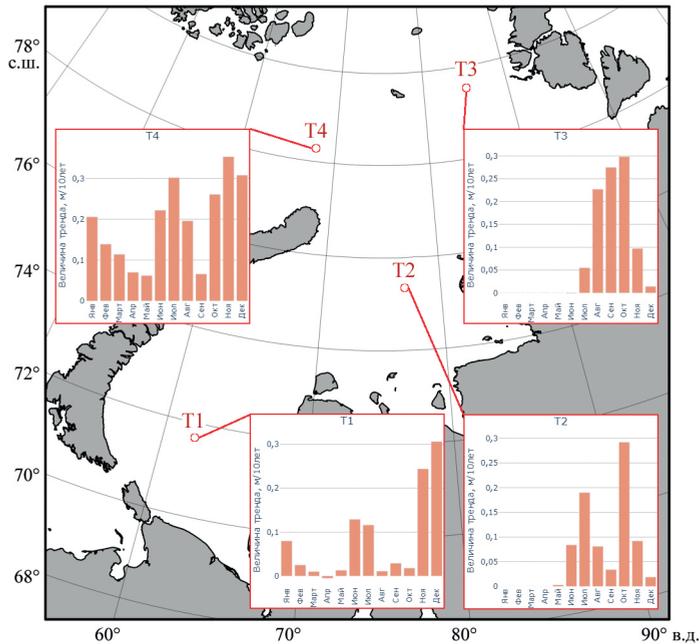


Рис. 6. Величины трендов средней высоты значительных волн по месяцам в точках Т1–Т4 Карского моря на основе многолетнего анализа

Fig. 6. The values of trends in the average wave height by months at points T1–T4 in the Kara Sea based on a multi-year analysis

зованием различных методических подходов. Сложность данного вопроса заключается в том, что уменьшение площади морских льдов неоднозначно влияет и на циркуляцию атмосферы, в том числе и на приводный ветер [25, 26]. Количественная оценка вклада данных параметров в изменчивость волнового режима является перспективным направлением дальнейшей работы. Также не вполне очевидно, какая скорость и продолжительность ветра вызывает волны определенной высоты, для оценки влияния ветра. Климатические изменения в направлении ветра приводят к изменению разгона и, следовательно, параметров ветрового волнения. Эти вопросы требуют дальнейшей глубокой проработки.

Закключение

В ходе работы был выполнен анализ пространственной изменчивости трендов средних, максимальных и 95-го перцентиля значительных высот волн. Тренды оценивались как для всего периода, так и отдельно для безледного.

На всей акватории моря величины трендов для среднегодовых значений положительные. Максимальная величина характерна для границы с Баренцевым морем и едва превышает 0,2 м/10 лет. Для максимальных волн значимые положительные тренды характерны для северной и северо-восточной частей моря. Максимальные величины трендов для 95-го перцентиля высот волн характерны также для северной части Карского моря.

Для безледного периода максимальные величины трендов характерны и для среднегодовых, и для 95-го перцентиля высот волн в северной части моря (максимальные величины трендов $\sim 0,25$ м/10 лет и $\sim 0,5$ м/10 лет соответственно).

Значимые положительные тренды для среднегодовых значений высоты волн характерны для южной части моря, в то время как для максимальных высот волн наибольшие и значимые тренды наблюдаются на северо-востоке. Такое распределение связано с тем, что именно северный и северо-восточный районы моря большую часть года покрыты льдом, соответственно, изменения ледового климата здесь отражаются сильнее (в том числе отступление ледовой кромки дальше на север). Для центральной и юго-западной частей характерно отсутствие трендов для среднегодовых значений высот волн в безледный период, что может также свидетельствовать о том, что изменение именно ледового режима является основным фактором, определяющим изменения волнения.

По картам трендов ветра видно, что для большей части акватории характерно увеличение средних скоростей ветра, однако величины трендов (максимальные до 0,3 м/с за 10 лет) не являются существенными и не согласуются с картами трендов максимальных высот волн. Это также говорит нам о том, что вклад трендов скорости ветра в изменение высот волн меньше, чем вклад изменчивости ледяного покрова.

Для точки в юго-западной части Карского моря характерно, что в период январь–май большее количество лет узел покрыт льдом. Значимые положительные тренды были найдены для июля и для ноября. Наибольшие величины трендов в ноябре характерны для максимальных высот волн (0,42 м/10 лет).

В период с декабря по апрель в центральной части Карского моря волнение отсутствует. Положительные значимые тренды найдены в июле, августе и октябре. Максимальная величина тренда средних за весь период высот волн 0,29 м/10 лет (октябрь), а за безледный период — 0,12 м/10 лет (июль).

На севере-востоке Карского моря период, когда узел покрыт льдом, больше в сравнении с другими точками (с ноября по май). Положительные значимые тренды характерны для максимальной и 95-го перцентиля за весь период (0,67 и 0,48 м/10 лет) и для средней и 95-го перцентиля за безледный период (0,24 и 0,47 м/10 лет) в сентябре.

Значимые положительные тренды на границе с Баренцевым морем характерны для июня, августа и октября. Максимальная величина тренда характерна для максимальных значений в июне — каждые 10 лет высота волн увеличивается в среднем на 0,8 м.

Для центральной и северо-восточной частей Карского моря характерно отсутствие трендов с января по май–июнь, что связано с ледовым режимом в данных областях. На границе же с Баренцевым морем тренды во все месяцы положительные, с максимальными в ноябре. На юго-западе Карского моря максимальные величины трендов характерны для декабря, что может объясняться более поздним ледообразованием.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа Е.Е. Кругловой подготовлена в рамках выполнения темы FMWE-2024-0016 государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Работа С.А. Мысленкова и В.С. Платонова выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-33. Расчеты по оценкам трендов скорости ветра выполнены В.С. Платоновым с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Вычислительный комплекс для моделирования климата и радиационного мониторинга».

Competing interests. There is no conflict of interest.

Financing. The work of E.E. Kruglova has been prepared within the theme FMWE-2024-0016 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The work of S.A. Myslenkov and V.S. Platonov was supported by the Moscow State University Development Program, project No. 23-Sh07-33. Calculations based on estimates of wind speed trends were performed by V.S. Platonov using the equipment of the Center for Collective Use “Computing Complex for Climate Modeling and Radiation Monitoring”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Matveeva T.A., Semenov V.A. Regional features of the Arctic Sea ice area changes in 2000–2019 versus 1979–1999 periods. *Atmosphere*. 2022;13(9):1434. <https://doi.org/10.3390/atmos13091434>
2. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата. *Исследование Земли из космоса*. 2015;(2):5–19. <https://doi.org/10.7868/S0205961415020025>
Aleksseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanickij V.M., Harlanenkova N.E., Yulin A.V. Evolution of the Arctic Sea ice cover area in the context of modern climate change. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploring the Earth from space*; 2015;(2):5–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0205961415020025>
3. Serreze M. C., Stroeve J. Arctic Sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015;373(2045):20140159. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0159>
4. Шалина Е.В. Сокращение ледяного покрова Арктики по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013;10(1):328–336.
Shalina E.V. Arctic sea ice retreat from satellite passive microwave observations. *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2013;10(1):328–336. (In Russ.)
5. Wang X.L., Feng Y., Swail V.R., Cox A. Historical changes in the Beaufort–Chukchi–Bering Seas surface winds and waves, 1971–2013. *Journal of Climate*. 2015;28(19):7457–7469. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0190.1>
6. Thomson J., Fan Y., Stammerjohn S., Stopa J., Rogers W.E., Girard-Ardhuin F., Ardhuin F., Shen H., Perrie W., Shen H., Ackley S., Babanin A., Liu Q., Guest P., Maksym T., Wadhams P., Fairall C., Persson O., Doble M., Graber H., Lund B., Squire V., Gemmrich J., Lehner S., Holt B., Meylan M., Brozena J., Bidlot J.R. Emerging trends in the sea state of the Beaufort and Chukchi seas. *Ocean Modelling*. 2016;105:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.02.009>
7. Liu Q., Babanin A. V., Zieger S., Young I.R., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters. *Journal of Climate*. 2016;29:7957–7975. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0219.1>
8. Casas-Prat M., Wang X.L. Sea ice retreat contributes to projected increases in extreme Arctic Ocean surface waves. *Geophysical Research Letters*. 2020;47(15):e2020GL088100. <https://doi.org/10.1029/2020GL088100>
9. Waseda T., Nose T., Kodaira T., Sasmal K., Webb A. Climatic trends of extreme wave events caused by Arctic cyclones in the western Arctic Ocean. *Polar Science*. 2021;27:100625. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100625>
10. Waseda T., Webb A., Sato K., Inoue J., Kohout A., Penrose B., Penrose S. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic Ocean. *Scientific reports*. 2018;8(1):4489. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22500-9>

11. Li J.G. Ocean surface waves in an ice-free Arctic Ocean. *Ocean Dynamics*. 2016;66(8):989–1004. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0964-9>
12. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С. *Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей*. СПб.: Российский Морской регистр судоходства; 2009. 358 с.
13. Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year wave hindcast, storm activity, and probability analysis of storm waves in the Kara Sea. *Water*. 2021;13(5):648. <https://doi.org/10.3390/w13050648>
14. Круглова Е.Е., Мысленков С.А. Анализ штормовой активности в Карском море по данным волновой модели WAVE WATCH III. *Гидрометеорология и экология*. 2022;(69):675–690. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-675-690>
Kruglova E.E., Myslenkov S.A. Analysis of storm activity in the Kara Sea according to the wave model WAVE WATCH III. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):675–690 (In Russ.). <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-675-690>
15. Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea. *Regional Studies in Marine Science*. 2019;(30):100719. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100719>
16. Myslenkov S., Kruglova E., Medvedeva A., Silvestrova K., Arkhipkin V., Akpinar A., Dobrolyubov S. Number of storms in several Russian Seas: trends and connection to large-scale atmospheric indices. *Russ. J. Earth. Sci.* 2023; 23(3):ES3002. <https://doi.org/10.2205/2023es000828>
17. Мысленков С.А., Платонов В.С., Сильвестрова К.П., Добролюбов С.А. Рост штормовой активности в Карском море с 1979 по 2019 г. по данным моделирования. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021;498(2):175–182. <https://doi.org/10.31857/S2686739721060128>
Myslenkov S.A., Platonov V.S., Silvestrova K.P., Dobrolyubov S.A. The growth of storm activity in the Kara Sea from 1979 to 2019 according to modeling data. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2021;498(2):175–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739721060128>
18. Tolman H., Abdolali A., Accensi M., Alves J.-H., Arduhin F., Babanin A., Barbariol F., Benetazzo A., Bidlot J., Booij N., Boutin G., Bunney C., Campbell T., Chalikov D., Chawla A., Cheng S., Collins C., Filipot J.-F., Flampouris S., Liang Z. *User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07*. College Park, MD, USA: Tech.Note; 2019. 465 p.
19. Sharmar V., Markina M. Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980-2019. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021;21(2):ES2002. <https://doi.org/10.2205/2020ES000741>
20. Cabral I.S., Young I.R., Toffoli A. Long-term and seasonal variability of wind and wave extremes in the Arctic Ocean. *Frontiers in Marine Science*. 2022;(9):802022. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.802022>
21. Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В., Прохорова У.В. Оценка многолетней изменчивости толщины припая в морях Российской Арктики по данным полярных станций. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(3):310–330. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330>
Timofeeva A.B., Sharatunova M.V., Prokhorova U.V. Estimation of long-term variability of solder thickness in the seas of the Russian Arctic according to data from polar stations. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(3):310–330. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330>
22. Степина А.А., Подрезова Н.А. Оценка изменчивости площади льда Карского моря. В кн.: *Материалы Всероссийской научно-практической конференции Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития*, 21–23 марта 2023. СПб.: РГГМУ. 2023. С. 465–467.

- Stepina A.A., Podrezova N.A. Assessment of the variability of the ice area of the Kara Sea. In book: Materials of the All-Russian scientific and Practical conference *Gidrometeorologiya i fizika atmosfery: sovremennye dostizheniya i tendencii razvitiya = Hydrometeorology and Atmospheric Physics: Modern Achievements and Development trends*. 21–23 march 2023. SPb.: RSHU; 2023; P. 465–467. (In Russ.)
23. Федоров В.М., Залиханов А.М., Дегтярев К.С. Особенности межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии. *Арктика и Антарктика*. 2023;(2):102–114. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.2.41008>
- Fedorov V.M., Zalikhanov A.M., Degtyarev K.S. Features of the interannual variability of the sea ice area in the Northern hemisphere. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctic*. 2023;(2):102–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.2.41008>
24. Semenov V.A., Latif M. Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012. *Environmental Research Letters*. 2015;10(5):054020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/5/054020>
25. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование. *Лед и снег*. 2013;53(2):53–62.
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch., Pogarsky F.A. Changes in the distribution of sea ice in the Arctic and related climatic effects: diagnostics and modeling. *Lyod i sneg = Ice and snow*. 2013;53(2):53–62. (In Russ.)