

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 675—690.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):675—690.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.466.3:001.891.573](268.52)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-675-690

Анализ штормовой активности в Карском море по данным волновой модели WAVEWATCHIII

***Елизавета Евгеньевна Круглова^{1, 2},
Станислав Александрович Мысленков^{2, 3, 4}***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, lissavetaandin@gmail.com

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

³ Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва

⁴ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва

Аннотация. В статье выполнен анализ штормовой активности в Карском море, основанный на данных моделирования ветрового волнения по модели WAVEWATCHIII за период с 1979 по 2019 г. В качестве исходных данных использовались данные о ветре и концентрации льда из реанализов NCEP/CFSR/CFSv2. Вычисления выполнялись на неструктурной вычислительной сетке с разрешением от 700 м до 20 км. Выполнен анализ повторяемости случаев штормового волнения. Обнаружены положительные тренды для штормов с критериями 2—5 м за период с 1979 по 2019 г. Найден положительный значимый тренд для продолжительности штормов высотой > 2 м, равный 5 ч / 10 лет. Установлены два основных района группировки штормов: граница с Баренцевым морем и восточнее Карских ворот.

Ключевые слова: штормовая активность, ветровые волны, WAVEWATCHIII, Карское море, моделирование волнения.

Благодарности. Работа С. А. Мысленкова выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Работа Е. Е. Кругловой подготовлена в рамках выполнения темы № FMWE-2021-0002 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Для цитирования: Круглова Е. Е., Мысленков С. А. Анализ штормовой активности в Карском море по данным волновой модели WAVEWATCHIII // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 675—690. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-675-690.

Original article

Analysis of storm activity in the Kara Sea according to the wave model WAVE WATCH III

Elizaveta E. Kruglova^{1, 2}, *Stanislav A. Myslenkov*^{2, 3, 4}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, lissavetaandin@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Moscow

³ P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow

⁴ Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Moscow

Summary. The article analyzes storm activity in the Kara Sea, based on the data of wind wave modeling using the WAVEWATCHIII model for the period from 1979 to 2019. Wind and ice concentration data from NCEP/CFSR/CFSv2 reanalysis were used as initial data. Calculations were performed on a non-structural computational grid, covering the Barents and Kara Seas, as well as the entire northern part of the Atlantic Ocean. The spatial resolution varies from ~ 700 m in the coastal zone of the Kara Sea, to ~ 20 km in the open part of the Kara Sea. The Peak Over Threshold (POT) technique was used to analyze storm activity in the Kara Sea. The calculation method is as follows: setting a criterion (in our case, wave heights from 2 to 6 m), followed by calculating the number of transitions of the studied value through the criterion. The event (storm) begins when the criterion is exceeded and ends with the reverse transition through the criterion (down). The duration of the event was calculated as the difference between the start and end time of the event. The data obtained on the number of storms per year based on a multi-year and seasonal multi-year sample were checked for trends, the linear regression model being used as trends. To assess trends for significance, an analysis was carried out on the adequacy of regression models according to the Fisher criterion. It was found that the number of storms with a height of > 2 meters increased by more than 2 times during the period from 1979 to 2019. Positive trends were noticed for storms with criteria of 2—5 meters. One positive trend was found for storms > 2 meters high: storms become longer by 7 hours every 10 years. Significant positive trends for the number of storms (criterion 2—5 m) by season were observed in the periods October—December and January—March. The maximum magnitude of trends (for storms with a criterion of 2 meters — 3 storms / 10 years) is typical for the period January—March. There are two main areas of storm grouping – the border with the Barents Sea and to the east of the Kara Gate. Since 1994, there has been a noticeable increase in the number of storms in the Kara Sea north of 76 °N and east of the Kara Gate.

Keywords: storm activity, wind waves, WAVE WATCH III, Kara Sea, wave modeling.

Acknowledgments. The work of S. A. Myslenkov was supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global environmental changes”. The work of E. E. Kruglova has been prepared within the theme FMWE-2021-0002 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences.

For citation: 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 = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):675—690. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-675-690. (In Russ.).

Введение

Арктический регион особенно сильно подвержен значительным климатическим изменениям, в том числе сокращению площади морских льдов [1—2]. В связи с этим появляется большая свободная ото льда водная поверхность [3—4], влияющая на режим ветрового волнения Арктики, в том числе и Карского моря.

Актуальность работы заключается в том, что изучение изменений, происходящих в режиме ветрового волнения, крайне важно для морского транспорта, наиболее подверженному рискам, связанными с волнением на море. Изменение ветрового волнения влияет на движение судов по Северному морскому пути. Также ветровое волнение оказывает влияние на морскую прибрежную инфраструктуру, на добычу полезных ископаемых, в том числе и на акватории Карского моря [5].

Карское море расположено преимущественно на шельфе, с преобладающими глубинами 50—100 м, а наибольшая глубина моря — 620 м [6]. С октября по июнь море покрыто льдами. Таяние льдов начинается с конца мая — начала июня и происходит вначале в устьях рек, а затем в открытой части моря [7]. В осенне-зимний период наблюдается увеличение средних значений скорости ветра до 8 м/с, что связано с увеличением количества циклонов. Летом скорость ветра падает до 5 м/с [6]. В работах [8—9] изучается изменение циклонической активности в Арктике, а в [10] описываются результаты реанализа и прогноза волн в Карском море с использованием ветра WRF.

Последнее десятилетие характеризуется значительным потеплением климата, сокращением площади многолетнего и сезонного льда в Арктике [3, 4] и появлением значительно большей, свободной ото льда поверхности моря. В работе [11] В. П. Карклиным и И. Д. Карелиным были приведены результаты многолетних наблюдений за припайными полыньями арктических морей, в том числе Карского моря, за период 1980—2009 гг. В работе [12] исследовалась общая тенденция к увеличению границ стационарных полыньей, а также присутствие слитых полыньей и уменьшение площади припайного льда, что говорит о процессах динамики ледообразования, наблюдающихся в Карском море в 2009—2019 гг. В обзорной статье [13] представлены свидетельства из различных опубликованных источников, позволяющих заключить, что именно изменения характеристик ледового покрова в значительной степени способствовали изменениям в океане и полярной атмосфере.

В статье [14] выявлены отрицательные тренды в ледовитости Карского моря в период с 1982 по 2015 г. Также отрицательные тренды площади распространения морского льда в период с 1979 по 2017 г. отмечаются в работе [15]. В летние месяцы и ранней осенью с 2000 по 2019 г. тренды сокращения льда возрастают по сравнению с 1979—1999 гг. [3]. По прогностическим оценкам, очищение Баренцева и Карского морей в сентябре от морского льда может произойти в 2026 г. [16].

Ранее ветровое волнение в арктических морях рассматривалось в работах [17—22]. Также сведения о режиме ветрового волнения Карского моря представлены в статьях [7, 23—26]. Однако многолетние тренды штормовой активности не изучались. Данная работа является продолжением работ [23, 26] с анализом сезонной изменчивости штормовой активности и продолжительности штормовых событий.

Цель данной работы состоит в оценивании межгодовой и сезонной изменчивости штормовой активности и продолжительности штормов в Карском море на основе данных спектральной волновой модели WAVEWATCHIII с 1979 г. по 2019 г., и выявлении особенностей пространственного распределения штормов.

Данные и методы

Для анализа ветрового волнения использовалась база данных, полученная на основе данных моделирования из работы [23]. При создании этой базы использовалась волновая модель WAVEWATCHIII 6.07 и схема генерации волн ST6 [27]. Расчеты проводились с использованием неструктурной сетки, состоящей из 37729 узлов. 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. Для дальнейшего анализа штормовой активности из общей сетки были выбраны узлы, находящиеся строго в пределах Карского моря. Границы Карского моря взяты из [6, 28]. При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 ч из реанализа NCEP/CFSR (1979—2010) с пространственным разрешением $\sim 0,3^\circ$ и реанализа NCEP/CFSv2 (2011—2019) с разрешением $\sim 0,2^\circ$.

Информация об оценках качества волновой модели на основе прямых и спутниковых измерений (Cryosat, Saral и Sentinel) представлена в [20, 23, 26]. При сопоставлении модельных данных со спутниками получено, что коэффициент корреляции составляет $\sim 0,9$, среднеквадратическое отклонение меняется от 0,32 до 0,39 м. В нашей работе выполнены дополнительные оценки качества результатов моделирования на основе данных измерений в Обской губе (71° с.ш., $73,56^\circ$ в.д.), выполненных в 2015—2017 гг. и опубликованных в [24]. Результаты сравнения представлены на рис. 1. При сопоставлении данных измерений и результатов моделирования получены коэффициенты корреляции от 0,81 до 0,87, среднеквадратическое отклонение от 0,16 до 0,26 м, индекс рассеяния от 0,42 до 0,70.

Выходные данные модели представляют собой характеристики ветрового волнения с дискретностью 3 ч с 1979 по 2019 г. Продолжительность модельных расчетов составила 41 год. В работе использовалась высота значительных волн (H_s).

Для анализа штормовой активности (далее — штормов) в Карском море использована методика Peak Over Threshold (POT). Применение данной методики

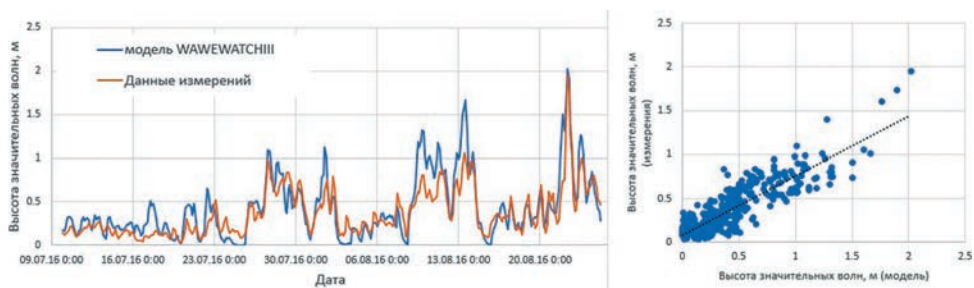


Рис. 1. Сопоставление результатов моделирования и данных измерений за период с 10.07.2016 по 25.08.2016 в Обской губе [24].

Fig. 1. Comparison of results modeling and measurement data for the 10.07.2016 — 25.08.2016 period [24].

можно встретить в работах [7, 8, 20, 25]. Методика расчета заключалась в следующем: задается критерий (в нашем случае выбраны критерии высоты волн от 2 до 6 м) и проводится подсчет количества переходов исследуемой величины через критерий. При превышении критерия событие (шторм) начинается, при обратном переходе через критерий (вниз) событие заканчивается. Продолжительность шторма вычисляется как разность между временем конца и начала события. Подсчет штормов производится для всей акватории Карского моря. Если время между двумя штормами составляло менее 9 ч (3 срока), то считалось, что это один большой шторм. Как только время между ними превышало 9 часов — шторма считались как два отдельных.

Полученные данные о количестве штормов в год на основе многолетней и сезонной многолетней выборки были исследованы на наличие трендов. В качестве трендов выступала модель линейной регрессии ($y = a_1x + a_0$). Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и имеет размерность характеристики y за единицу дискретности. Для оценки трендов на значимость проводился анализ на адекватность моделей регрессии по критерию Фишера, проверка коэффициентов регрессии на значимость и проверка коэффициента детерминации на значимость. Для оценки адекватности проверялась гипотеза о равенстве дисперсий $H_0 : D_y = D_e$ и альтернативная $H_1 : D_y \neq D_e$. Здесь D_y — дисперсия модели, характеризующая изменчивость линии регрессии относительно среднего значения модели; D_e — дисперсия остатков, характеризующая отклонение уравнения регрессии от фактических значений. Для оценки использовался рассчитанный критерий Фишера, который сравнивался с критическим значением критерия Фишера при заданном уровне значимости 5 %. Если эмпирическое значение критерия Фишера больше критического, гипотеза о равенстве дисперсий отвергалась, что означает в рассматриваемом случае адекватность регрессионной модели или, другими словами, значимость линейного тренда. Для проверки коэффициентов регрессии на значимость была выдвинута гипотеза $H_0 : a_i = 0; b = 0$ при $H_1 : a_i \neq 0; b \neq 0$. Для проверки рассчитываются критерии Стьюдента. Для проверки коэффициента детерминации на значимость выполнялась проверка нулевой гипотезы $H_0 : r = 0$ и альтернативной ей. Проверка выполнялась также по критерию Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Сезонная изменчивость высоты значительных волн

На основе данных моделирования были получены средние и максимальные многолетние значения высоты значительных волн для стандартных календарных сезонов: зима (декабрь—февраль), весна (март—май), лето (июнь—август), осень (сентябрь—ноябрь). Когда Карское море замерзает, характеристики волнения равны 0. При осреднении эти характеристики учитываются как 0.

На рис. 2 а видно, что максимальные высоты значительных волн зимой наблюдаются севернее Новой земли и достигают ~11 м на границе с Баренцевым морем. Для зимы средняя многолетняя высота значительных волн составляет < 0,5 м (рис. 2 б).

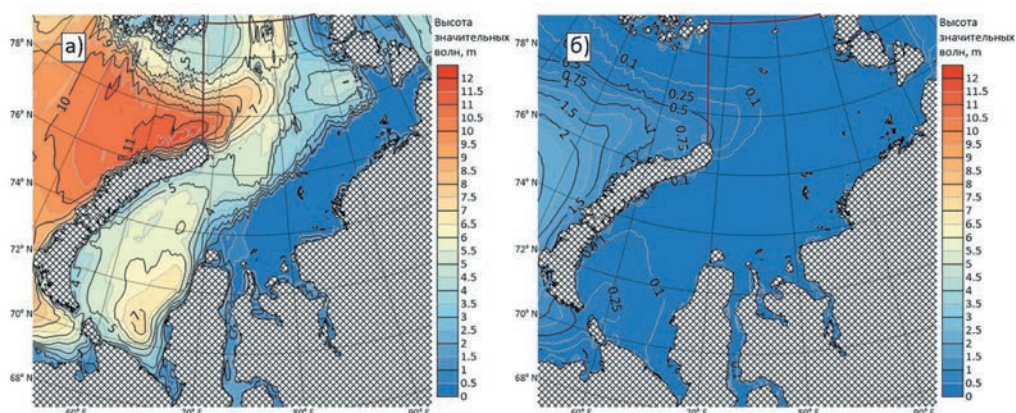


Рис. 2. Максимальная (а) и средняя (б) многолетняя высота значительных волн зимой за период с 1979 по 2019 гг.

Fig. 2. Maximum (a) and average (b) long-term of significant wave height in winter for the 1979—2019 period.

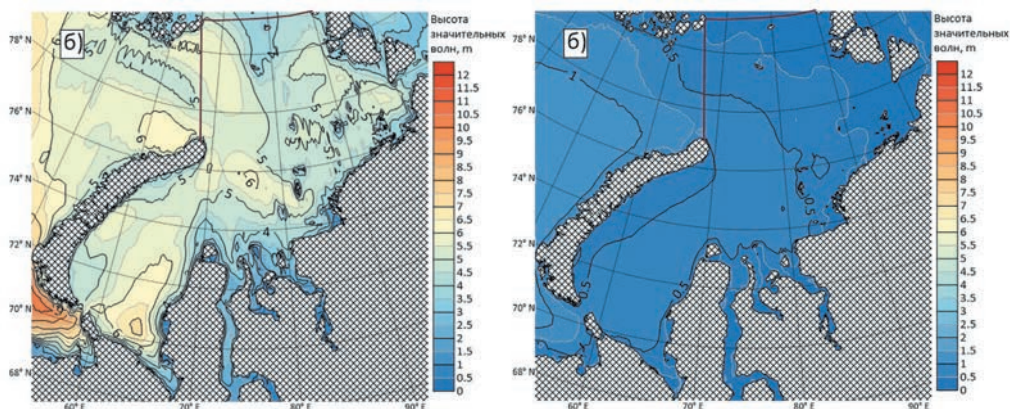


Рис. 3. Максимальная (а) и средняя (б) многолетняя высота значительных волн летом за период с 1979 по 2019 гг.

Fig. 3. Maximum (a) and average (b) long-term of significant wave height in summer for the 1979—2019 period.

Для весны средняя высота на всей акватории Карского моря < 0,5 м. Максимальная высота волн наблюдается также на границе с Баренцевым морем и не превышает 5,5 м. Наблюдаются локальные максимумы южнее Новой земли, их высота не превышает 4,5 м.

Летом средняя высота волн достигает 0,6—0,7 м в центральной части моря, на границе с Баренцевым морем и в проливе Карские ворота (рис. 3 б). Максимум

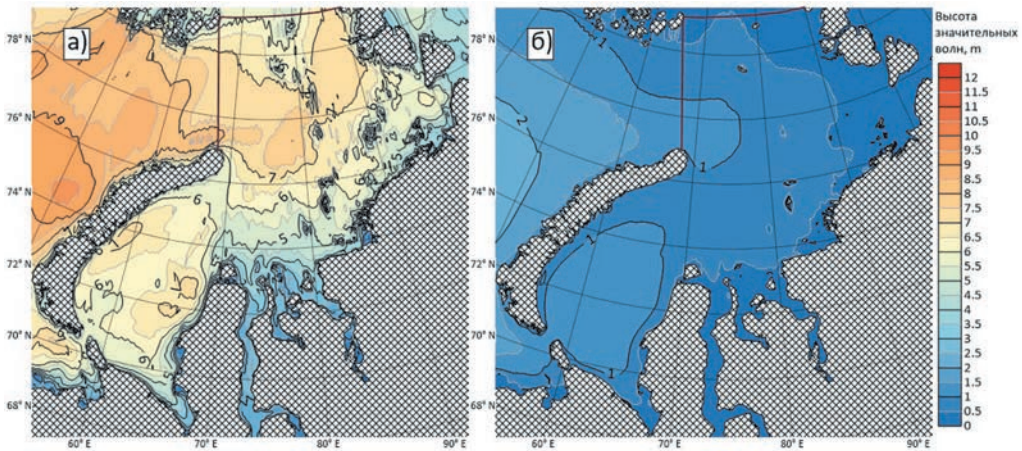


Рис. 4. Максимальная (а) и средняя (б) многолетняя высота значительных волн осенью за период с 1979 по 2019 г.

Fig. 4. Maximum (a) and average (b) long-term of significant wave height in autumn for the 1979—2019 period.

наблюдается около Байдарацкой губы и составляет ~ 7 м (рис. 3 а). Еще один локальный максимум приходится на центральную часть Карского моря, но он не превышает 6,5 м.

На рис. 4 б видно, что для осени характерно повышение средней высоты значительных волн до 1,2 м севернее Новой Земли и восточнее Карских ворот. На большей части Карского моря средняя высота волн $> 0,5$ м. Максимумы (рис. 4 а) наблюдаются в районе Байдарацкой губы и в северной части Карского моря (высота волны > 7 м). Расположение максимумов высоты значительных волн в осенний период похоже на расположение максимумов в летний сезон. Это объясняется тем, что из-за муссонного характера ветрового режима в Карском море в первой части осени заметно увеличивается повторяемость ветров, характерных для летних условий [6].

Межгодовая и сезонная изменчивость штормовой активности

По методике ROT [29] был выполнен анализ количества случаев штормового волнения в год с высотами значительных волн от 2 до 6 м (рис. 5 а). Среднее многолетнее количество штормов высотой > 2 м равно 45, а высотой > 3 м — 30. Максимальное количество штормов с высотой > 2 м наблюдалось в 1995 г. (65 штормов), а с высотой > 3 м — приходится на 2016 г. (62 штормов) и 2018 г. (64 шторма). В 2016 г. также наблюдался абсолютный максимум штормов с высотой волны более 4 м (34 шторма), а в 2018 г. абсолютный максимум для штормов с высотой значительных волн более 5 м составлял 13 штормов. Найдены значимые положительные тренды для штормов с критерием 2—5 м. Максимальная величина тренда

наблюдается у штормов с критерием 3 м — 0,65 шторм/год, т. е. каждые десять лет количество штормов с высотой значительных волн более 3 метров увеличивается на 7 (на 20 %). Увеличение числа штормов во времени связано с уменьшением площади морского льда [1, 3—5].

При анализе была также оценена средняя продолжительность шторма с разными критериями для каждого года. На рис. 5 б видно, что самые многочисленные шторма с высотами > 2 м являются так же самыми продолжительными. Средняя продолжительность такого шторма за весь период составляет ~55 ч или 2,3 сут, максимальная средняя — 80 ч или ~3,3 сут в 2016 г. Тренд положительный,

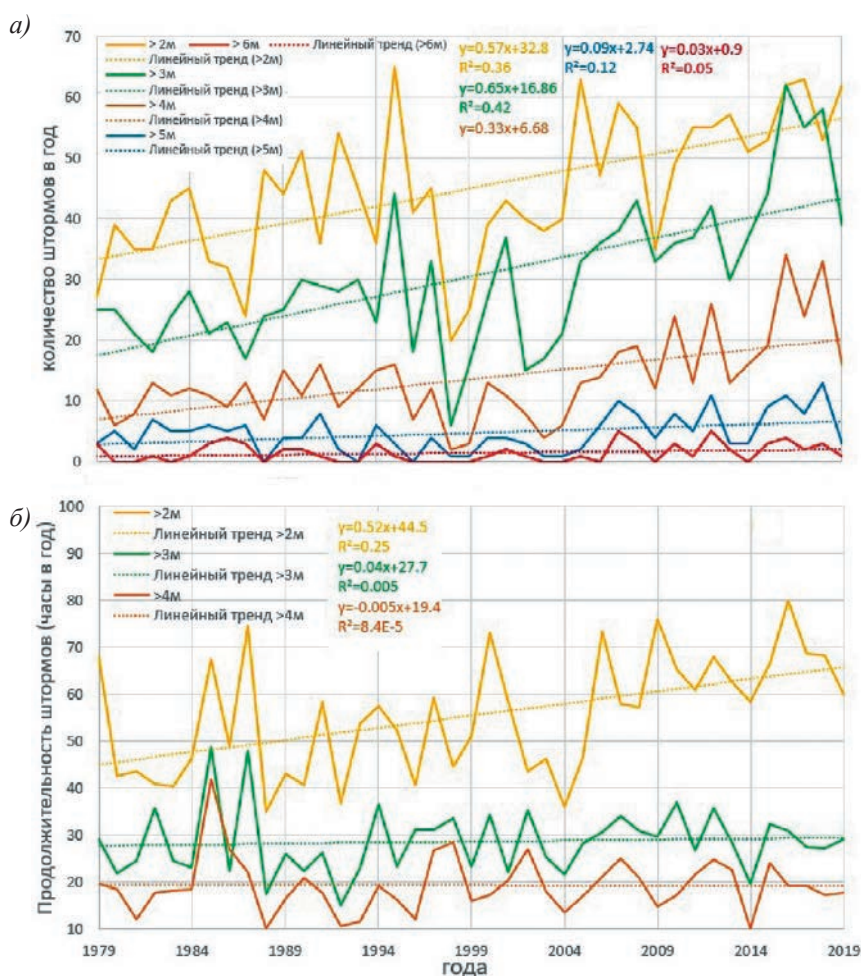


Рис. 5. Изменение количества штормов в год (а), средняя продолжительность шторма в год (б).

Fig. 5. Changes in the number of storms per year (a), the average duration of a storm per year (b).

значимый — каждые 10 лет шторма с высотой значительных волн более 2 м становятся продолжительнее на 5 ч. Тренды для продолжительности штормов остальных критериев оказались незначимыми.

Были выполнены оценки значимости трендов по сезонам года, которые разделялись формально на периоды январь—март, апрель—июнь, июль—сентябрь, октябрь—декабрь. Черным пунктиром на графиках отмечены средние за периоды площади свободной ото льда поверхности в долях от площади Карского моря.

На рис. 6 *a* видно, что в январе—марте количество штормов с высотой значительных волн от 2 до 4 м увеличивается. Положительные тренды являются значимыми. Максимальная величина тренда для периода январь—март наблюдается у штормов с критерием 2 м — количество штормов растет почти на 3 шторма каждые 10 лет. В январе—марте наблюдается наибольшая корреляция между долей свободной ото льда поверхности моря и количеством штормов — 0,85 (для штормов с высотой волны > 4 м). На рис. 6 *b* видно, что не каждый год в апреле—июне бывают шторма высотой более 3 м. Тренды положительны и значимы для всех штормов с высотой волн 2—4 м. Для июля—сентября характерно большее по численности количество случаев штормовой активности, однако величины трендов невелики (не более 1 шторма каждые 10 лет). Значимым является только положительный тренд для штормов с высотой волн > 3 м. Для этого же периода характерен самый большой положительный тренд площади свободной ото льда поверхности Карского моря. В октябре—декабре (рис. 6 *c*) наблюдается максимальное количество штормов по сезонам с высотой волн 3 м, равное 29. Пик приходится на 2018 г. и наблюдается на других штормах (с высотой волн 4—5 м). Тренды положительны, значимы для штормов 3—5 м. Максимальная величина тренда приходится для штормов с высотами > 3 м — 2 шторма / 10 лет.

На рис. 7 представлены карты пространственного распределения максимальных значений высоты волн для каждого шторма высотой > 2, 3 и 4 м для восьми временных отрезков по пять лет (кроме последнего с периодом шесть лет). Проводился визуальный анализ районов скопления штормов. На всех картах наблюдается два четких района, в которых группируется большое количество штормов: граница Карского и Баренцева морей (севернее Новой Земли) и район восточнее Карских ворот. Первый район связан с распространением волн из акватории Баренцева моря. Второй район тоже связан с влиянием Баренцева моря, а также характеризуется более длительным безледным периодом. Прослеживается тенденция появления штормов в северной части Карского моря из-за уменьшения площади ледового покрова в последние годы. Начиная с 1994 г. заметно увеличение числа штормов севернее 76° с.ш. Отмечается также периодичность в численности штормов на границе с Баренцевым морем: если в 1994—1998 гг. штормов вдоль границы много (пик в 1994 г. — 67 штормов (рис. 2 *a*)), то в следующие пять лет их наблюдается меньше. В 2004—2008 гг. численность штормов в этом районе опять увеличивается. Также можно отметить наибольшее количество штормов высотой > 2 м в период 2014—2019 гг., соответствующим пику численности штормов зимой в 2017 г. и весной в 2016 г.

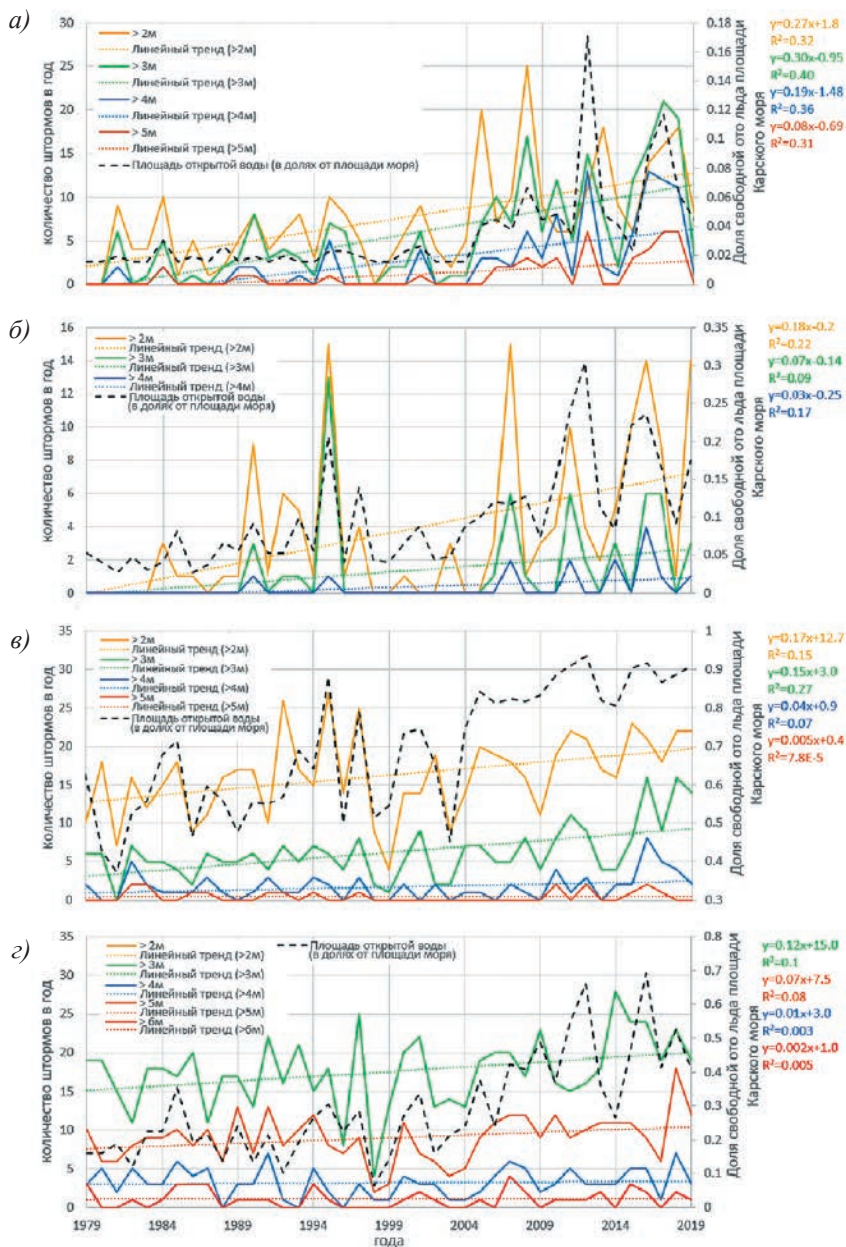


Рис. 6. Изменения количества штормов:

а) январь—март; б) апрель—июнь; в) июль—сентябрь; з) октябрь—декабрь.

Fig. 6. Changes in the number of storms:

а) January—March; б) April—June; в) July—September; з) October—December.

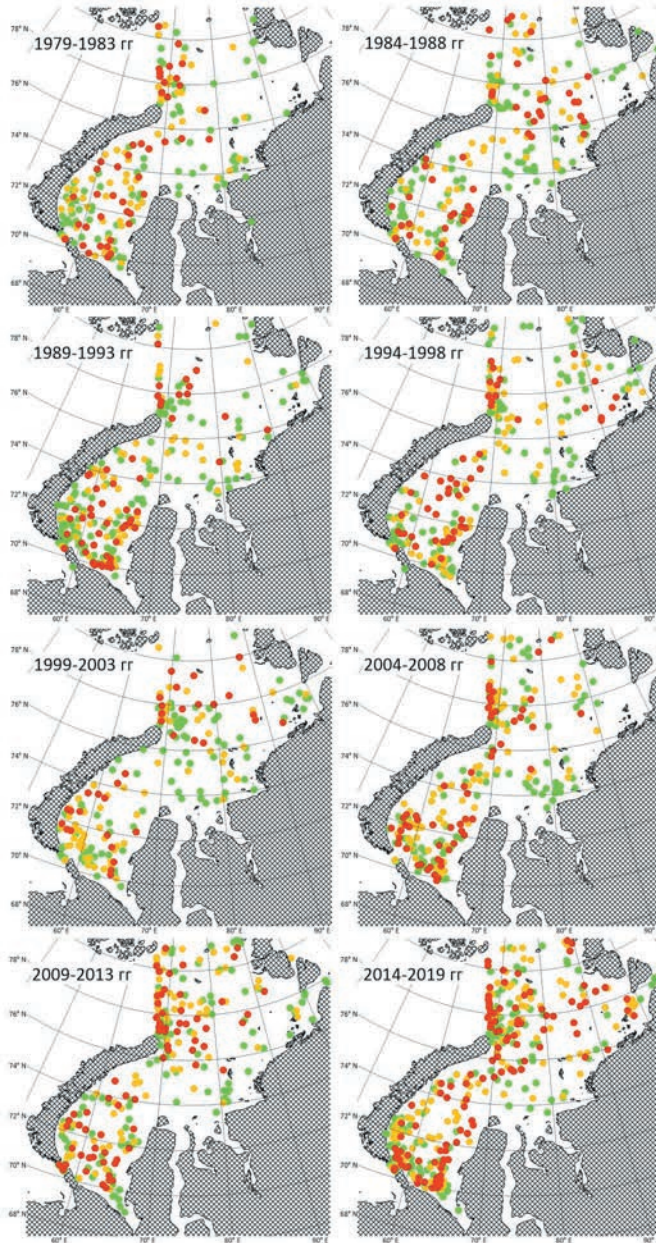


Рис. 7. Пространственная изменчивость расположения максимума штормов значительных волн высотой более 2 м (зеленые), 3 м (желтые), 4 м (красные) в период с 1979 по 2019 г.

Fig. 7. Spatial variability of the location of the maximum storms significant wave height of more than 2 m (green), 3 m (yellow), 4 m (red) in the period from 1979 to 2019.

При анализе рис. 5 видно, что с 2004 г. количество штормов на акватории Карского моря больше, чем в период с 1997 по 2003 г., что хорошо согласуется с оценками трендов ледовитости в работах [5, 12, 14].

Заключение

Максимальная межгодовая высота значительных волн $\sim 11,2$ м наблюдается в период декабрь—январь на границе Карского и Баренцева морей. Максимальные средние значения $\sim 1,3$ м характерны для того же района в период сентябрь—ноябрь.

За период с 1979 по 2019 г. количество штормов высотой > 2 м увеличилось более чем в 2 раза. Обнаружены положительные тренды для штормов с высотой 2—5 м. Тренд для штормов с высотой > 6 м не значим. Максимальная величина тренда наблюдается у штормов с высотами волн > 3 м — 7 штормов / 10 лет, т. е. количество штормов увеличивается на 20 % каждые 10 лет.

Найден один положительный тренд для продолжительности штормов высотой > 2 м: шторма становятся продолжительнее на 5 ч каждые 10 лет. Тренды для продолжительности штормов остальных критериев оказались незначимыми.

Значимые положительные тренды для количества штормов (высотой 2—5 м) по сезонам выявлены в периоды октябрь—декабрь и январь—март. Максимальная величина трендов (для штормов с высотами 2 м — 3 шторма / 10 лет) характерна для периода январь—март. Летом наблюдается только один значимый положительный тренд для штормов с критерием 3 м. Для периода январь—март характерно почти полное отсутствие штормов с высотой волн > 4 м до 2004 г., после чего они стали возникать в среднем 4 раза в год. Таким образом, максимальный вклад в межгодовую изменчивость количества штормов вносит период октябрь—март.

При совместном анализе количества штормов и доли свободной ото льда поверхности Карского моря выявлено, что наиболее сильные изменения в площади морского льда (ПМЛ) наблюдаются в период июль—декабрь. При учете слабых ветров в летнее время над Карским морем и увеличения циклонической активности в осенний сезон можно сделать вывод, что из-за наиболее активного сокращения ПМЛ в период октябрь—декабрь и наибольшей корреляции между количеством штормов и долей свободной поверхности моря в январе—марте, именно период октябрь—март вносит значительный вклад в изменения штормовой активности Карского моря.

При анализе пространственной изменчивости найдено два основных района группировки штормов: граница с Баренцевым морем и к востоку от Карских ворот. С 1994 г. заметно увеличение количества штормов Карского моря севернее 76° с.ш. и восточнее Карских ворот. Наибольшее количество штормов на акватории Карского моря характерно для 2014—2019 г.

Список источников

1. Семенов В. А., Мартин Т., Беренс Л. К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // Лед и Снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 77—107. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.

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 ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5—40. doi: 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. V. 373, № 2045. P. 20140159. doi: 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. Т. 10, № 1. С. 328—336.
5. Гачаев А. А. Конструктивные особенности морских сооружений для условий юго-западной части Карского моря // World science: problems and innovations. 2021. С. 72—74.
6. Мокиевский В. О., Цетлин А. Б., Сергиенко Л. А. и др. Экологический Атлас. Карское море. М.: ООО «Арктический научный центр», 2016. 271 с.
7. Лопатухин Л. И., Бухановский А. В., Чернышева Е. С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей // Российский Морской регистр судоходства. СПб., 2009. 358 с.
8. Tilinina N., Gulev S. K., Bromwich D. H. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41, № 5. P. 1766—1772.
9. Kislov A., Matveeva T. The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea // Atmospheric and Climate Sciences. 2020. V. 10, № 03. P. 339. doi: 10.4236/acs.2020.103019
10. Diansky N. A., Fomin V. V., Kabatchenko I. M., Gruzinov V. M. Simulation of circulation of the Kara and Pechora Seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics // Arctic: ecology and economy. 2014. № 1(13). P. 57—73.
11. Карелин И. Д., Карклин В. П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX — начале XXI века. СПб.: ААНИИ, 2012. 179 с.
12. Путьрский В. Е., Юлин А. В., Павлова Е. А., Кашкова В. С. Исследование динамики заприпайных полыньей Карского моря в зимний период // Природообустройство. 2021. № 4. С. 110—115. doi: 10.26897/1997-6011-2021-4-110-115.
13. Иванов В. В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434
14. Старцева А. В., Старцев Л. А. К вопросу о сокращении ледовитости Карского моря // Метеорологический вестник. 2016. Т. 8, № 2. С. 43—69.
15. Малинин В. Н., Вайновский П. А. К сравнению характеристик межгодовой изменчивости площади морского льда Северного и Южного полушария // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 57. С. 77—90. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-77-90.
16. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 98—109, doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-98-109.
17. Stora J., Arduin F., Girard-Arduin F. Wave climate in the Arctic 1992—2014: seasonality and trends. Cryosphere. 2016. № 10(4). P. 1605—1629. doi:10.5194/tc-10-1605-2016.
18. Surkova G, Sokolova L, Chichev A. Long-term regime of extreme winds in the Barents and Kara seas // Vestnik Moskovskogo universiteta. 2015. Serija 5: Geografija. 5. P. 53—58.
19. 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 and White Seas and their future climate projections // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11, № 1. P. 93—112. doi: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-93-112.
20. Мысленков С. А., Маркина М. Ю., Архипкин В. С., Тилинина Н. Д. Повторяемость штормового волнения в Баренцевом море в условиях современного климата // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019. № 2. С. 45—54.
21. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики. М.: Издательство «Нефтяное хозяйство», 2015. 128 с.
22. Чешм С. В., Кудрявцев В. Н., Юровская М. В. Параметрическая модель поверхностных волн в приложении к Арктическим морям // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 515—530. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-515-530.

23. 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. Т. 498, № 2. С. 175—182. doi: 10.31857/S2686739721060128.
24. Коробов П. В., Алексеев В. В., Дымов В. И., Яковлева Н. П., Смирнов К. Г. Верификация модельных расчетов волнения на акватории Обской губы по данным инструментальных измерений в 2015—2017 годах // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2. С. 79—89. doi: 10.37162/2618-9631-2020-2-79-89.
25. Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea // Reg. Stud. Mar. Sci. 2019. Article 100719.
26. 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, Russia. Water — 2021. Vol. 13, № 648. doi: 10.3390/w13050648.
27. Tolman H. (2019) The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, available.
28. International Hydrographic Organization: [Электронный ресурс]: IHO PUBLICATION S-23 Limits of Oceans and Seas. Draft 4th Edition, 1986. URL: https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/S-23WG/S-23WG_Misc/Draft_1986/Draft_1986.htm (дата обращения: 09.11.2021).
29. Lopatoukhin L., Rozhkov V., Ryabinin V., Swail V., Boukhanovsky A., Degtyarev A. Estimation of Extreme Wind Wave Heights. World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD-No. 1041; WMO & IOC; Geneva; 2000.

References

1. Semenov V. A., Martin T., Berens L. K., Latifa M., Astafyeva E. S. Changes in the area of Arctic sea ice in the ensembles of climate models CMIP3 and CMIP5. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2017;57(1):77—107. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107. (In Russ.).
2. Alekseev G. V., Alexandrov E. I., Glock N. I., Ivanov N. E., Smolianitskii V. M., Kharlanenkova N. E., Iulin A. V. Evolution of the area of the Arctic sea ice cover in the conditions of modern climate change. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Exploration from space*. 2015;(2):5—40. doi: 10.7868/S0205961415020025. (In Russ.).
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.
4. Shalina E. V. Reduction of the Arctic ice cover according to satellite passive microwave sensing. *Sovremennye problemy izucheniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of studying the Earth from space*. 2013;10(1):328—336. (In Russ.).
5. Gachaev A. A. Design features of marine structures for the conditions of the south-western part of the Kara Sea. *World science: problems and innovations*. 2021:72—74. (In Russ.).
6. Mokievsky V. O., Tsetlin A. B., Sergienko L. A. et al. *Ekologicheskij Atlas. Karskoe more = Ecological Atlas. The Kara Sea*. Moscow: ООО “Arkticheskij nauchnyj centr”, 2016: 271 p. (In Russ.).
7. Lopatukhin L. I., Bukhanovsky A. V., Chernysheva E. S. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Yaponskogo i Karskogo morej. *Rossiiskii Morskoi registr sudokhodstva = Russian Maritime Register of Shipping*. Saint-Petersburg, 2009: 358 p. (In Russ.).
8. Tilinina N., Gulev S. K., Bromwich D. H. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis. *Geophysical Research Letters*. 2014;41(5):1766—1772.
9. Kislov A., Matveeva T. The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea. *Atmospheric and Climate Sciences*. 2020;(10):339—356. doi: 10.4236/acs.2020.103019.
10. Diansky N. A., Fomin V. V., Kabatchenko I. M., Gruzinov V. M. Simulation of circulation of the Kara and Pechora Seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics. *Arctic: ecology and economy*. 2014;1(13):57—73.
11. Karelin I. D., Karklin V. P. *Pripai i zapripainye polyn'i arkticheskikh morei sibirskogo shel'fa v kontse XX — nachale XXI veka = Pripay and zapripayny polynyas of the Arctic seas of the Siberian shelf at the end of the XX – beginning of the XXI century*. St. Petersburg: AANII, 2012: 179 p. (In Russ.).

12. Putyrsky V. E., Iulin A. V., Pavlova E. A., Kashkova V. S.. Study of the dynamics of the sagebrush of the Kara Sea in winter. *Prirodoobustrojstvo = Environmental management*. 2021;(4):110—115. doi: 10.26897/1997-6011-2021-4-110-115. (In Russ.).
13. Ivanov V. V. Modern changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with the reduction of the sea ice cover. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(64):407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434. (In Russ.).
14. Startseva A. V., Startsev L. A. On the issue of reducing the ice cover of the Kara Sea. *Meteorologicheskij vestnik = Meteorological Bulletin*. 2016;8(2):43—69. (In Russ.).
15. Malinin V. N., Vainovsky P. A. To compare the characteristics of the interannual variability of the sea ice area of the Northern and Southern hemispheres. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2019;(57):77—90. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-77-90. (In Russ.).
16. Malinin V. N., Vainovsky P. A. When will the ice-free regime of the Arctic regions come? *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2019;(56):98—109. doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-98-109. (In Russ.).
17. Stopa J., Arduin F., Girard-Arduin F. Wave climate in the Arctic 1992—2014: seasonality and trends. *Cryosphere*. 2016;10(4):1605—1629. doi: 10.5194/tc-10-1605-2016.
18. Surkova G., Sokolova L., Chichev A. Long-term regime of extreme winds in the Barents and Kara seas. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Bulletin of the Moscow University*. 2015;(5):53—58.
19. 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 and White Seas and their future climate projections. *Geography, Environment, Sustainability*. 2018;11(1):93—112. doi: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-93-112.
20. Myslenkov S. A., Markina M. Yu., Arkhipkin V. S., Tilinina N. D. The frequency of storm surge in the Barents Sea in the conditions of modern climate. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Bulletin of the Moscow University*. 2019;(2):45—54. (In Russ.).
21. *Atlas gidrometeorologicheskikh i ledovykh uslovij morej rossijskoj Arktiki = Atlas of hydrometeorological and ice conditions of the seas of the Russian Arctic*. Moscow: Izdatel'stvo «Neftyanoe hozyajstvo», 2015: 128 p. (In Russ.).
22. Cheshm S. V., Kudryavtsev V. N., Yurovskaya M. V. Parametric model of surface waves in application to the Arctic seas. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(64):515—530. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-515-530. (In Russ.).
23. Myslenkov S. A., Platonov V. S., Sil'vestrova K. P., Dobrolyubov S. A. 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. doi: 10.31857/S2686739721060128. (In Russ.).
24. Korobov P. V., Alekseev V. V., Dymov V. I., Iakovleva N. P., Smirnov K. G. Verification of model calculations of waves in the water area of the Gulf of Ob according to instrumental measurements in 2015—2017. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological studies and forecasts*. 2020;(2):79—89. doi: 10.37162/2618-9631-2020-2-79-89. (In Russ.).
25. Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea. *Reg. Stud. Mar. Sci*. 2019. Article 100719.
26. 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, Russia. *Water*. 2021;13(648). doi: 10.3390/w13050648.
27. Tolman H. (2019) The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, available.
28. International Hydrographic Organization: [Electronic resource]: IHO PUBLICATION S-23 Limits of Oceans and Seas. Draft 4th Edition, 1986. Available at: https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/S-23WG/S-23WG_Misc/Draft_1986/Draft_1986.htm (accessed: 09.11.2021).
29. Lopatoukhin L., Rozhkov V., Ryabinin V., Swail V., Boukhanovsky A., Degtyarev A. Estimation of Extreme Wind Wave Heights. World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD-No. 1041; WMO & IOC; Geneva; 2000.

Информация об авторах

Елизавета Евгеньевна Круглова, студентка 4 курса бакалавриата Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета (до 06.2022 г.) и студентка 1 курса магистратуры кафедры океанологии географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (с 09.2022 г.), lissavetaandin@gmail.com.

Станислав Александрович Мысленков, канд. физ-мат. наук, старший научный сотрудник Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова на кафедре океанологии географического факультета

Information about the authors

Elizaveta E. Kruglova, 4th year undergraduate student of the Institute of Hydrology and Oceanology of the Russian State Hydrometeorological University (until 06.2022) and 1st year graduate student of the Department of Oceanology of the Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University (since 09.2022), lissavetaandin@gmail.com.

Stanislav A. Myslenkov, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher at Lomonosov Moscow State University at the Department of Oceanology of the Geographical Faculty.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 06.05.2022

Принята к публикации после доработки 19.09.2022

The article was received on 06.05.2022

The article was accepted after revision on 19.09.2022