

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-87-101>

УДК 551.466.31

Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях

С.А. Мысленков

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

г. Москва, Россия;

Институт океанологии имени П.П. Ширшова

Российской академии наук, Москва, Россия;

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва, Россия

stasocean@gmail.com

Выполнен анализ характеристик ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях по результатам численных экспериментов на основе волновой модели WAVEWATCH III с 1979 по 2021 год. Моделирование проводилось с использованием неструктурной вычислительной сетки с высоким разрешением (до 800 м) в прибрежной зоне. В качестве форсинга использован реанализ NCEP/CFSR/CFSv2. Построены карты распределения среднегодовых значений высоты, длины и периода волн. Для характерных точек в центральной части каждого моря вычислены среднегодовые значения высоты волн и проанализирована их межгодовая изменчивость. В море Лаптевых максимальная высота волн составляет 5–6 м, в Восточно-Сибирском море – 6–7 м, в Чукотском море – от 7 до 7.5 м. Анализ межгодовой изменчивости показал, что для всех рассматриваемых морей наблюдается положительный тренд для высоты волн. Наиболее сильное увеличение среднегодовой высоты волн наблюдается в Восточно-Сибирском море (от 0.4 до 1.4 м в безледный период).

Ключевые слова: море Лаптевых, Чукотское море, Восточно-Сибирское море, моделирование волнения, ветровое волнение в Арктике, WAVEWATCH III

Modeling of the wind waves in the Laptev, East Siberian and Chukchi seas

S.A. Myslenkov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

stasocean@gmail.com

The paper presents an analysis of wind wave parameters in the Laptev, East Siberian and Chukchi seas based on the results of numerical experiments with the WAVEWATCH III wave model for a period from 1979 to 2021. Wave modeling was carried out using an unstructured computational grid with a high resolution (up to 800 m) in the coastal zone. The NCEP/CFSR/CFSv2 reanalysis was used as wind forcing. The maps of the long-term mean values of the wave height, wave length and period were obtained. For the several points in the central part of each sea, the mean annual values of wave heights are calculated and the analysis of interannual variability is carried out.

The maximum significant wave height was 5–6 m in the Laptev Sea, 6–7 m in the East Siberian Sea, and 7–7.5 m in the Chukchi Sea. The analysis of interannual variability showed that there is a positive trend in wave height for all seas under consideration. The largest increase in the annual mean wave height is observed in the East Siberian Sea (from 0.4 to 1.4 m in the ice-free period).

Keywords: Laptev Sea, Chukchi Sea, East Siberian Sea, wave modeling, Arctic wind waves, WAVEWATCH III

Введение

В настоящее время в российской Арктике ведется активная хозяйственной деятельность, связанная с разведкой, добычей и транспортировкой полезных ископаемых, рыбным промыслом, судоходством. Активное развитие Северного морского пути позволило увеличить грузооборот за 2020 год до 33 млн тонн [2]. Существует устойчивый тренд на уменьшение площади морского льда в Арктике [11], следовательно, и длительность безледного периода увеличивается. В связи с этим представляется важным получить новые данные об изменчивости режима ветрового волнения в Арктике с учетом климатических изменений в последние десятилетия.

Ветровое волнение в морях восточного сектора российской Арктики весьма слабо освещено в отечественной литературе, что наглядно показано в обзорной статье [8]. Наиболее современные на данный момент результаты по анализу ветрового волнения акватории Восточно-Сибирского и Чукотского морей за период 2000–2015 гг. приведены в работе [1]. Расчеты выполнены на сетке с шагом 20×10 минут с форсингом ERA-Interim. Получено, что максимальные высоты волн не превысили 5 м в Восточно-Сибирском и 7 м в Чукотском море.

Подробный анализ изменчивости основных региональных показателей гидрометеорологического режима Восточно-Сибирского и Чукотского морей представлен в [10].

Параметры ветрового волнения также представлены в реанализе ERA5 [13] с шагом по пространству 0.5° . Этот реанализ волнения имеет высокое качество и часто применяется для различных научных исследований, однако из-за грубого пространственного разрешения для морей с большим количеством мелких островов, архипелагов и сложной береговой линией данные о параметрах волнения из ERA5 не могут обеспечить высокое качество для Арктики.

Анализ режима ветрового волнения в Арктике с 1991 по 2018 год получен в [12] на основе модели WAVEWATCH III и реанализа ERA5. Показаны положительные тренды экстремальной высоты волн в море Бофорта и Восточно-Сибирском море.

В ААНИИ на основе математического моделирования ведется работа по анализу и оперативному прогнозу параметров ветрового волнения в Арктике [3, 4].

Анализ климатических изменений штормовой активности в Арктике на основании анализа спутниковых данных представлен в [16, 18]. Ряды спутниковых данных обычно включают период только с 1994 года. Анализ высоты волн производится по данным различных спутников, но частота пролета даже над квадратом 30–30 км составляет не чаще 2–3 раз в сутки, поэтому многие шторма, и особенно максимальные высоты волн, просто не регистрируются спутниками.

В [18] показаны основные особенности волнового климата и тенденции для всей Арктики. Отмечено, что ледяной покров уменьшается и одновременно высота волн увеличивается. В [16] представлена климатология ветра и волнения Северного Ледовитого океана только для летнего периода (август – сентябрь). Показано, что средние значения высоты волн в море Лаптевых и в Чукотском море увеличиваются на 0.1–0.3 м за 10 лет. В [15] проведено моделирование волнения с 2007 по 2018 год для летнего периода (май–сентябрь) и показаны положительные тренды для высоты волн в целом для Арктики, и в частности для Карского, Чукотского морей и моря Бофорта. В Чукотском море увеличилась повторяемость волн с высотой более 3–4 м [15].

В [21] на основе реанализа ERA-Interim получены положительные тренды для максимальной высоты значительных волн и скорости ветра в море Лаптевых и море Бофорта. Тренды увеличения высоты волн в Чукотском море и море Бофорта за период 1971–2013 гг. получены в [20].

В данной работе представлены результаты расчетов ветрового волнения за период с 1979 по 2021 год в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях, а также получены оценки качества моделирования. Выполнен анализ распределения основных параметров ветрового волнения, получены оценки межгодовой изменчивости высоты волн.

Данные и методы

Для расчета параметров ветрового волнения в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях использовалась спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III версии 6.07 [19]. Эта волновая модель учитывает трех- и четырехкомпонентное резонансное нелинейное взаимодействие волн («triad» и «quadruplets»), эффекты обрушения и дифракции волн на малых глубинах, а также влияние морского льда.

В модели применялась схема генерации волн за счет передачи энергии ветра ST6, полученная в на основе экспериментальных и теоретических исследований в [22], для расчета нелинейных взаимодействий использована упрощенная схема DIA [14], для учета влияния льда схема IC0, в которой при сплоченности льда более 0.5 узлов сетки считается покрытым льдом [19]. Для учета воздействия придонного трения используется схема JONSWAP, где диссипация волновой энергии зависит от отношения фазовой и групповой скоростей волн и глубины [19].

Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений (т. е. с шагом 10° по направлению), частотный диапазон σ – 36 интервалов от 0.03 до 0.843 Гц. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового баланса составляет 15 минут, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии 60 секунд, шаг по времени для передачи энергии по спектру 450 секунд. Данный выбор продиктован конфигурацией вычислительной сетки: максимальным и минимальным расстоянием между узлами.

При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979–2010 гг.) с пространственным разрешением $\sim 0.3^\circ$ и реанализа NCEP/CFSv2 (2011–2021 гг.) с разрешением $\sim 0.2^\circ$. Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке, состоящей из 36176 узлов. Данная сетка покрывает акваторию моря Лаптевых, Чукотского и Восточно-Сибирского морей, а также часть Северного Ледовитого океана (рис. 1). Для прибрежной зоны исследуемых морей шаг сетки составляет около 800 м, а в открытой части около 10–15 км. На севере расчетная область имеет открытую границу, но статистически на этих широтах в 99 % случаев присутствует лед. Вторая открытая граница расположена в Беринговом море, но, учитывая узость пролива и наличие острова Св. Лаврентия, можно пренебречь потоком энергии в сторону Чукотского моря. Более подробное описание конфигурации модели и особенности проведения экспериментов для других морей изложены в [5, 6, 7, 9, 17].

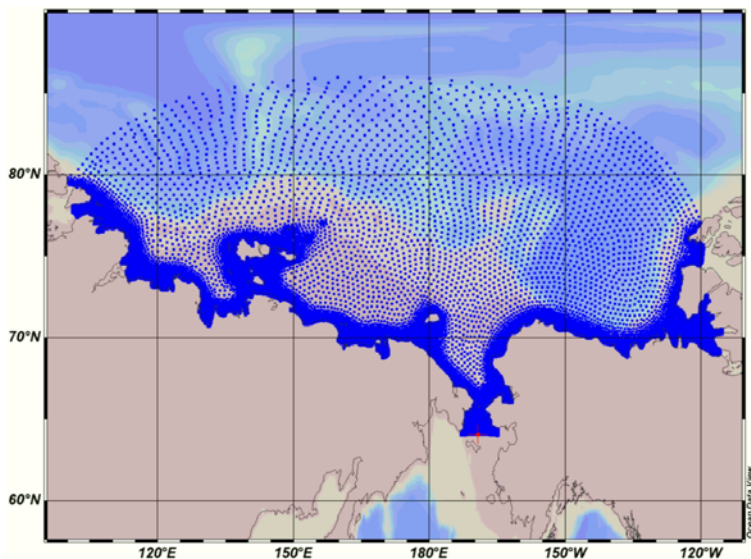


Рис. 1. Вычислительная неструктурная сетка для моря Лаптевых, Чукотского и Восточно-Сибирского морей.

Fig. 1. Computational unstructured grid for the Laptev, Chukchi and East Siberian Seas.

Для оценки качества волновой модели было произведено сравнение результатов моделирования с данными наблюдений за волнением (рис. 2), выполненных в 2012 году на станции NDBC №48213 (71.502 N 164.133 W, <https://www.ndbc.noaa.gov>). Коэффициент корреляции составил 0.95, систематическая ошибка -0.05 м, среднеквадратическая ошибка 0.27 м, коэффициент рассеяния 0.16. Анализируя результаты сравнения на рис. 2, можно заметить, что модель, как правило, занижает высоту волн. В данном случае данные измерений по высоте значительных волн представлены с интервалом по времени 4–6 минут, а по данным модели интервал 15 минут, что может сказаться на результате. С другой стороны, волновые модели чаще занижают пиковые значения, полученные по измерениям. Однако полученные оценки качества в целом совпадают с оценками для других морей, полученными на основе данных прямых и спутниковых наблюдений [1, 5, 10, 18].

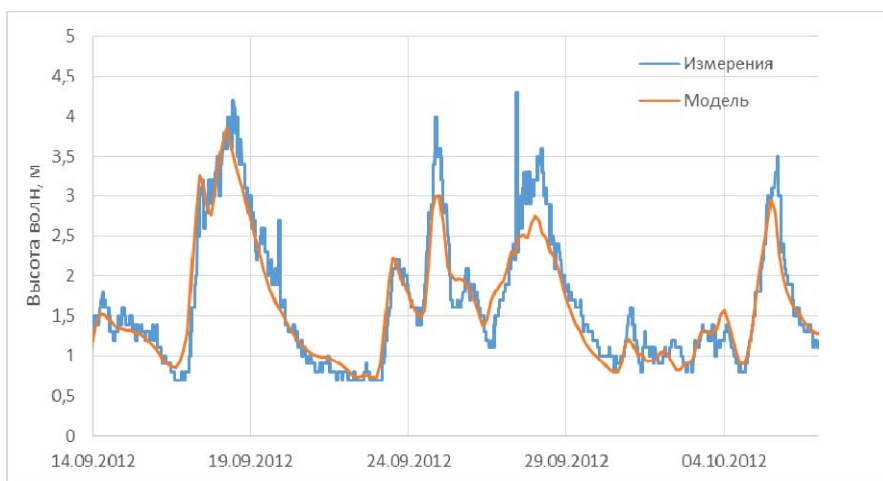


Рис. 2. Сравнение высоты значительных волн по результатам моделирования и по данным измерений на станции NDBC №48213.

Fig. 2. Comparison of the modeled significant wave heights with measurement data at NDBC station No.48213.

Для дополнительной оценки качества были использовали данные спутника CFOSAT (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cfosat.html>). Часть спутниковых данных была отфильтрована (удалена) из анализа, при наличии флагов плохого качества или если точки находились ближе, чем в 15 км от берега или кромки льда. Расстояние между парами сравниваемых точек из волновой модели и спутника составляло не более 13 км. С июля по декабрь 2019 года было собрано более 79 000 точек высоты волн со спутника для всей вычислительной области. Результаты оценок качества, основанных на спутниковых данных

CFOSAT, показаны на рис. 3. Коэффициент корреляции равен 0.89, систематическая ошибка -0.05 м, а среднеквадратическая ошибка 0.32 м. Индекс рассеяния равен 0.25. Полученный результат соответствует аналогичным оценкам, например, для Карского моря [17].

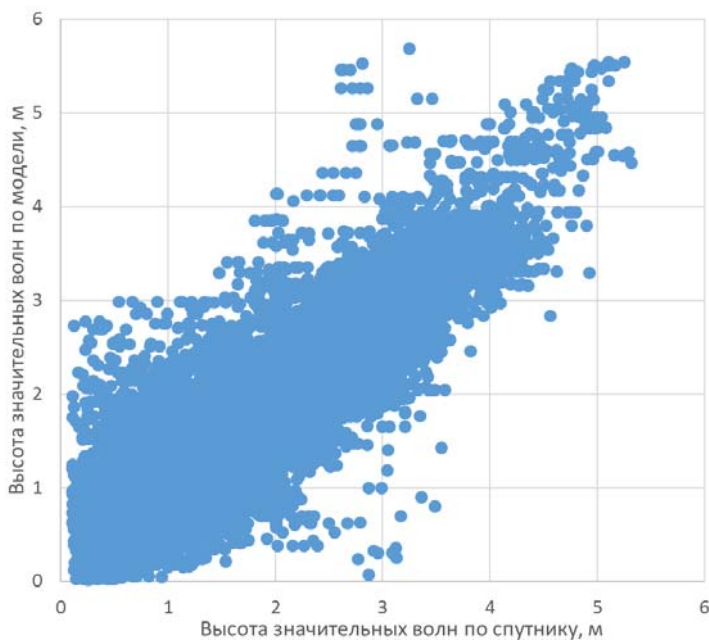


Рис. 3. Сравнение высоты значительных волн по данным спутника CFOSAT с результатами моделирования для всей расчетной области.

Рис. 3. Comparison of the significant wave heights obtained by CRYOSAT satellite data with the wave model results for the entire computational domain.

В результате проведенных расчетов для каждого узла вычислительной сетки получены характеристики ветрового волнения за каждые 3 часа с 1979 по 2021 год (всего 43 года). Далее для каждого узла сетки вычислялась средняя высота значительных волн (в те периоды, когда присутствует лед, высота волны считалась как 0 и учитывалась при вычислении среднего), максимальная высота волн и 95-й перцентиль. Такие же статистические параметры вычислялись для периода (T01) и средней длины волны.

Результаты

Средняя многолетняя высота значительных волн представлена на рис. 4. В море Лаптевых средняя высота волн составляет $0.1-0.3$ м. В Во-

сточно-Сибирском море – 0.1–0.2 м. В Чукотском море – от 0.2 до 0.7 м. Такие небольшие значения для средней высоты волн получены из-за того, что большую часть года моря покрыты льдом, и высота волн равна нулю. Более высокие средние значения на юге Чукотского моря наблюдаются из-за более мягких ледовых условий по сравнению с другими морями.

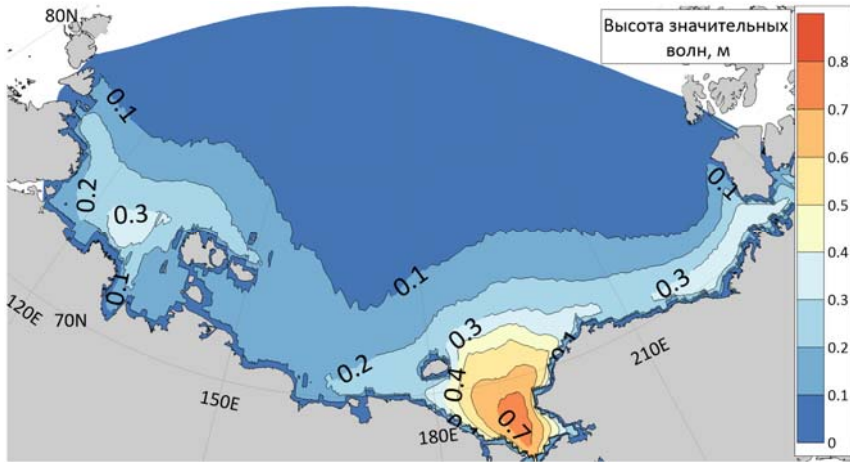


Рис. 4. Средняя многолетняя высота значительных волн (м) с 1979 по 2021 год.

Fig. 4. The mean long-term significant wave height (m) from 1979 to 2021.

Максимальная многолетняя высота значительных волн за весь период моделирования (43 года) представлена на рис. 5.

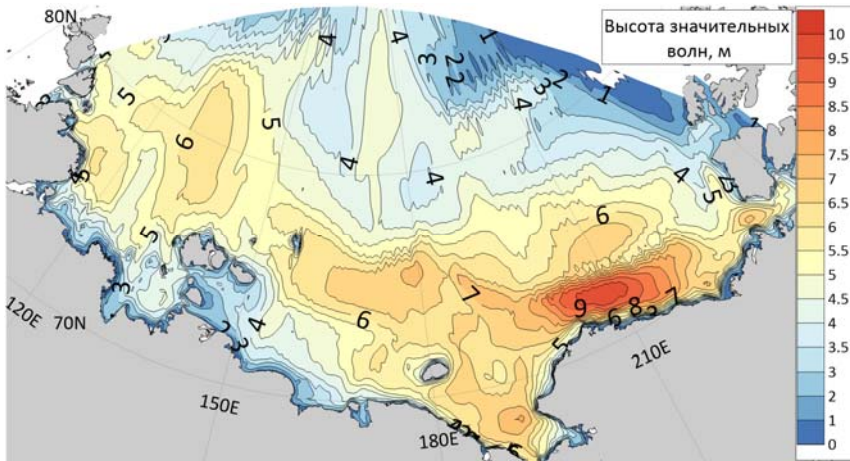


Рис. 5. Максимальная многолетняя высота значительных волн (м) с 1979 по 2021 г.

Fig. 5. The maximum significant wave height (m) from 1979 to 2021.

В море Лаптевых максимальная высота волн составляет 5–6 м. В Восточно-Сибирском море – 6–7 м. В Чукотском море – 7–7.5 м. Полученные результаты по максимальной высоте волн немного выше, чем результаты из [1]. Это может быть связано как с другой конфигурацией модели и другим реанализом ветра, так и с более длительным периодом анализа, включающим последние 5–7 лет, когда морского льда стало существенно меньше и при развитии штормов появился дополнительный разгон. Также за последние годы могло произойти усиление скорости ветра. На северной границе вычислительной области около 170° в. д. наблюдаются значения максимальной высоты волн 3.5–4 м, что не характерно для данной акватории. Действительно, в сентябре 2016 года открытая вода доходила почти до 85° с. ш., и ошибки моделирования нет. Ситуации с отсутствием льда в данном районе наблюдались всего три раза за 43 года.

Высота значительных волн 95-го перцентиля представлена на рис. 6. Данный параметр меняется от 0.5 до 2.5 м для исследуемых морей и является удобным для анализа штормового волнения. В море Лаптевых высота значительных волн 95-го перцентиля составляет около 1.5 м, а в Чукотском море – 2.5 м.

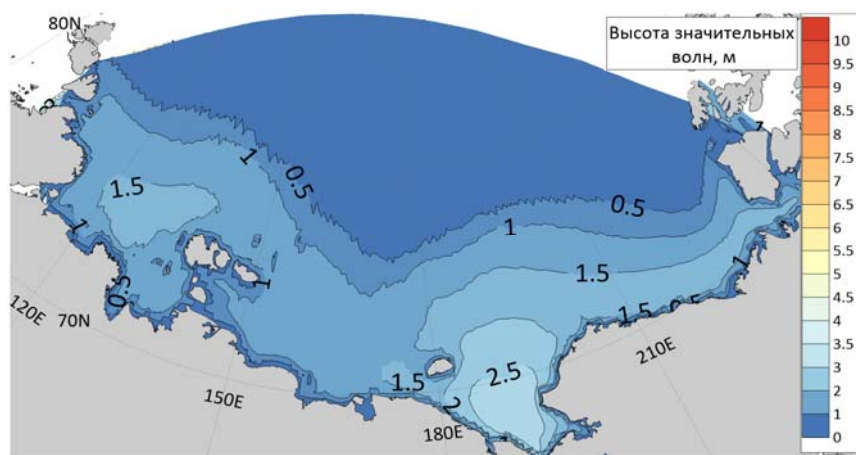


Рис. 6. Высота значительных волн 95-го перцентиля с 1979 по 2021 г.
Fig. 6. The 95 percentile of significant wave height (m) from 1979 to 2021.

Средняя длина волн составляет около 8–12 м для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. В Чукотском море средняя длина волн составляет 12–26 м. Значения среднего многолетнего периода – от 1 до 2.5 секунд. Значения очень небольшие, так как во время присутствия льда все характеристики волн равны 0. Поэтому для длины и периода волн чаще используют ассоциированные с высотой волн значения.

Для большей наглядности рассмотрим 95-й перцентиль средней длины и среднего периода волн. Период волн 95-го перцентиля в море Лапте-

вых составляет 4.5–5 секунд, в Восточно-Сибирском море – 4–5 секунд, Чукотском море – 5.5–6 секунд (рис. 7). Длина волн 95-го перцентиля в море Лаптевых составляет 45–55 м, в Восточно-Сибирском море 40–55 м, в Чукотском море 65–70 м (рис. 8).

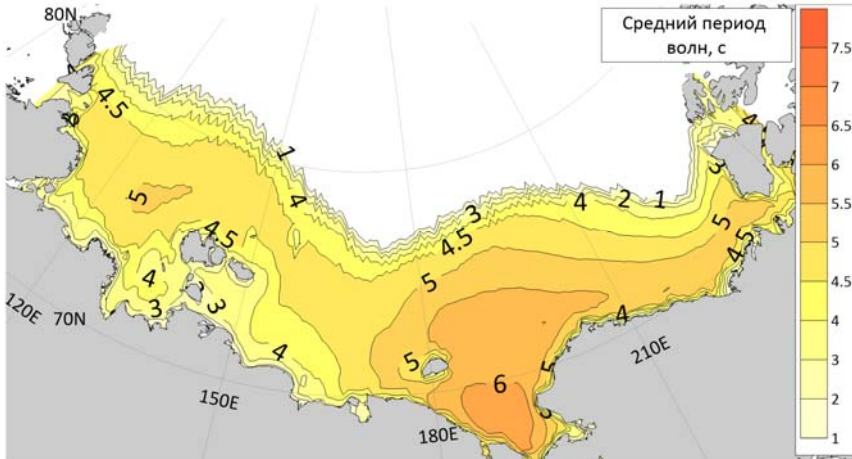


Рис. 7. Период волн (с) 95-го перцентиля с 1979 по 2021 г.
Fig. 7. The 95 percentile of average wave period (s) from 1979 to 2021.

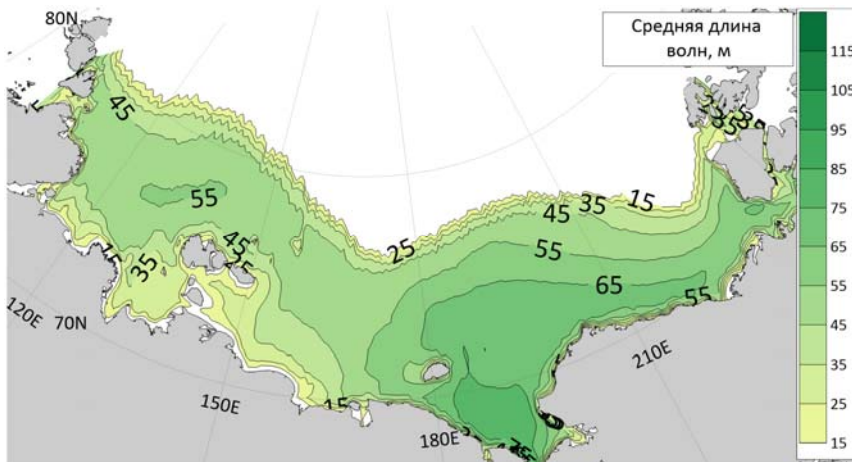


Рис. 8. Длина волн (м) 95-го перцентиля с 1979 по 2021 г.
Fig. 8. The 95 percentile of average wave length (m) from 1979 to 2021.

Для анализа межгодовой изменчивости были выбраны точки примерно в центре каждого моря (рис. 9), соответствующие локальным максимумам высоты значительных волн 95-го перцентиля.

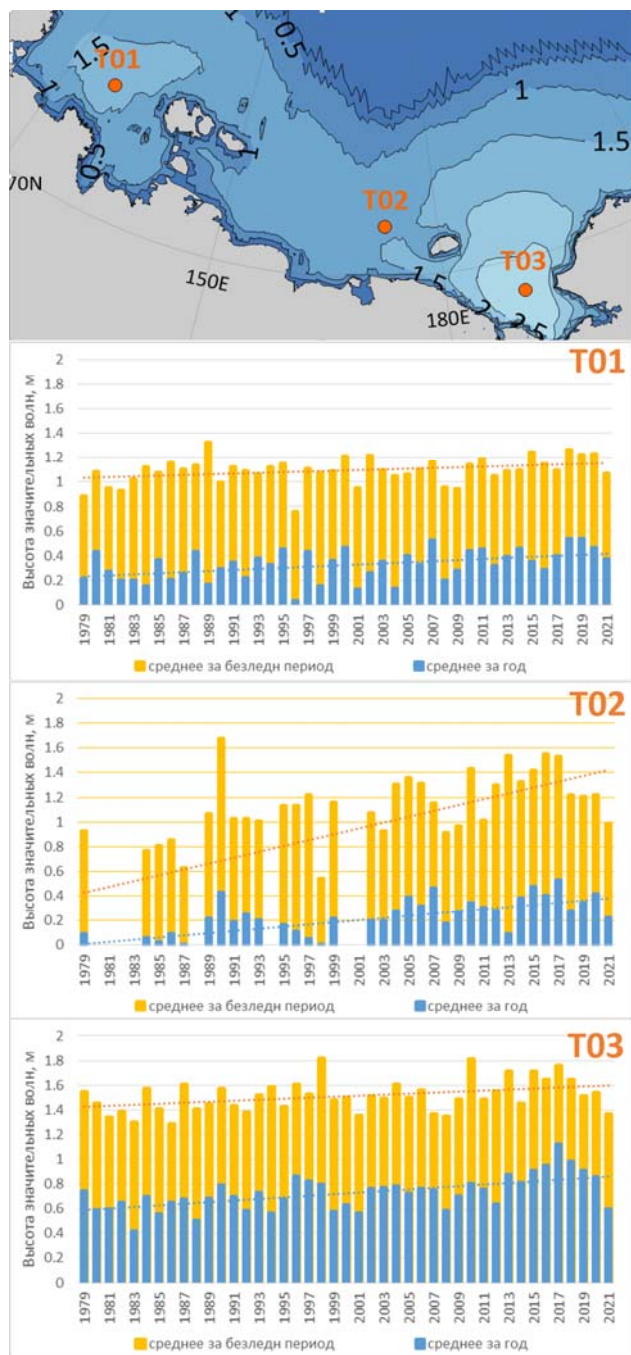


Рис. 9. Межгодовая изменчивость высоты волн для отдельных точек в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях.

Fig. 9. Interannual variability of wave height for several points in the Laptev, Chukchi and East Siberian Seas.

Проанализирована межгодовая изменчивость среднегодовой (по всему году) высоты значительных волн и среднегодовой высоты значительных волн для безледного периода. В море Лаптевых (точка T01) для высоты волн наблюдается положительный тренд как для всего года, так и для безледного периода. Средняя высота волн увеличилась от 0.2 до 0.4 м, что связано с большей длительностью безледного периода в последние годы. Однако, при анализе высоты волн для безледного периода, наблюдается незначимый положительный тренд от 1 до 1.1 м (рис. 9).

В Восточно-Сибирском море (точка T02) тренды для высоты волн положительные и значимые как для всего года, так и для безледного периода (рис. 9). Приблизительно до 2002 года в этой точке в отдельные годы открытая вода вообще отсутствовала. После 2002 года длительность безледного периода существенно увеличилась, что и привело к росту средней высоты волн. Также существенно увеличилась высота волн в безледный период от 0.4 до 1.4 м, что может быть связано как с увеличением разгона, так и с увеличением скорости или изменением направления ветра.

В Чукотском море (точка T03) тренды для высоты волн положительные и значимые как для всего года, так и для безледного периода (рис. 9).

Для всех рассматриваемых морей можно отметить, что с 2017 по 2021 год идет стабильное уменьшение средней высоты волн (рис. 9). Это особенно хорошо выражено в Восточно-Сибирском и Чукотском морях. Предварительный анализ показал, что средняя скорость ветра для этих точек уменьшается. Это подчеркивает важность климатических исследований параметров ветрового волнения, так как межгодовая изменчивость довольно высокая.

Заключение

На основе волновой модели WAVEWATCH III проведены расчеты параметров ветрового волнения для моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Выполнена оценка качества моделирования: коэффициент корреляции при сравнении с данными измерений составляет 0.95, а среднеквадратическая ошибка 0.27 м. Получены данные о средней и максимальной высоте значительных волн, длине и периоде волн с 1979 по 2021 год.

В море Лаптевых средняя высота волн составляет 0.1–0.3 м, в Восточно-Сибирском море – 0.1–0.2 м, Чукотском море – от 0.2 до 0.7 м. Максимальная многолетняя высота значительных волн за весь период моделирования (43 года) составляет в море Лаптевых 5–6 м, в Восточно-Сибирском море – 6–7 м, Чукотском море – 7–7,5 м.

Анализ межгодовой изменчивости параметров ветрового волнения показал, что во всех рассматриваемых морях наблюдается положительный тренд для высоты волн. Наиболее сильное увеличение среднегодовой высоты волн характерно для Восточно-Сибирского моря (от 0.4 до 1.4 м

в безледный период). Однако при этом для всех рассматриваемых морей с 2017 по 2021 год идет стабильное уменьшение средней высоты волн в связи с уменьшением скорости ветра.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект № 23-27-00239).

Список литературы

1. *Вражкин А.Н.* Режим волнения морей восточной Арктики в начале XXI столетия // Труды ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155. С. 164-177.
2. *Гурлев И.В., Макоско А.А., Малыгин И.Г.* Анализ состояния и развития транспортной системы Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 2 (46). С. 258-270. DOI 10.25283/2223-4594-2022-2-258-270
3. *Дымов В.И., Яковлева Н.П.* Ветровое волнение на акватории арктических морей // Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. СПб.: ААНИИ, 2016. С. 93-99.
4. *Коробов П.В., Алексеев В.В., Дымов В.И., Яковлева Н.П., Смирнов К.Г.* Верификация модельных расчетов волнения на акватории Обской губы по инструментальным данным измерений в 2015-2017 годах // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 79-89.
5. *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.
6. *Мысленков С.А., Маркина М.Ю., Киселева С.В., Столярова Е.В., Архипкин В.С., Умнов П.М.* Исследование ресурсов энергии волн в акватории Баренцева моря // Теплоэнергетика. 2018. № 7. С. 5-15.
7. 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.
8. *Нестеров Е.С.* Ветровое волнение в Арктических морях (обзор) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 19-41.
9. *Платонов В.С., Мысленков С.А., Архипкин В.С., Кислов А.В.* Высокорастворимое моделирование гидрометеорологических полей в прибрежных районах Карского моря в условиях сложной конфигурации береговой линии // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 1. С. 87-106.
10. *Плотников В.В., Вражкин А.Н., Мезенцева Л.И., Друзь Н.И., Вакульская Н.М., Дубина В.А.* Изменчивость гидрометеорологического режима морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское) в современный период // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 7. С. 103-115.
11. *Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И.* Изменения ледовых условий плавания по маршруту Обская губа – Берингов пролив за 1998-2018 годы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 3. С. 65-75.
12. *Cabral I.S., Young I.R., Toffoli A.* Long-Term and Seasonal Variability of Wind and Wave Extremes in the Arctic Ocean // Front. Mar. Sci. 2022. Vol. 9. P. 80. DOI: 10.3389/fmars.2022.802022

13. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., ... Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the royal meteorological society. 2011. Vol. 137 (656). P. 553-597.

14. Hasselmann S., Hasselmann K., Allender J.H., Barnett T.P. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models // J. Phys. Oceanogr. 1985. Vol. 15. P. 1,378–1,391.

15. Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic // Cold Reg. Sci. Technol. 2019. Vol. 164. P. 102790. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.

16. Liu Q., Babanin A., Zieger S., Young I., Guan C. Wind and Wave Climate in the Arctic Ocean as Observed by Altimeters // Journal of Climate. 2016. Vol. 29 (22). P. 7957-7975.

17. 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. P. 648.

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

19. Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07. Tech. Note 333, March 2019. NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019.

20. Wang X.L., Feng Y., Swail V.R., Cox A. Historical changes in the Beaufort-Chukchi-Bering seas surface winds and waves, 1971–2013 // J. Climate. 2015. Vol. 28. P. 7457-7469.

21. Waseda T., Webb A., Sato K. et al. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic ocean // Sci. Reports. 2018. Vol. 8. Article No. 4489.

22. Zieger S., Babanin A.V., Rogers W.E., Young I.R. Observationbased source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH // Ocean. Mod. 2015. Vol. 96. P. 2-25

References

1. Vrazhkin A.N. The Eastern Arctic seas wave climate in the beginning of the 21st century. *Trudy DVNIGMI*, 2017, vol. 155, pp. 164-177 [in Russ.].

2. Gurlev I.V., Makosko A.A., Malygin I.G. Analysis of the state and development of the transport system of the Northern Sea Route. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 258-270. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-258-270 [in Russ.].

3. Dymov V.I., Yakovleva N.P. Vetrovoe volnenie na akvatorii arkticheskikh morey. *Obzor gidrometeorologicheskikh processov v Severnom Ledovitom okeane*. Saint Petersburg: AANII [Arctic and Antarctic Research Institute] publ., 2016, pp. 93-99 [in Russ.].

4. Korobov P.V., Alekseev V.V., Dymov V.I., Yakovleva N.P., Smirnov K.G. Verification of model calculations of waves in the Gulf of Ob on the basis of instrumental measurement data in 2015-2017. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 376, no. 2, pp. 79-89 [in Russ.].

5. Myslenkov S.A., Platonov V.S., Dobrolyubov S.A., Silvestrova K.P. Increase in storm activity in the Kara sea from 1979 to 2019: numerical simulation data. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 498, no. 2, pp. 502-508.
6. Myslenkov S.A., Markina M.Yu., Kiseleva S.V., Stoliarova E.V., Arkhipkin V.S., Umnov P.M. Estimation of Available Wave Energy in the Barents Sea. *Therm. Eng.*, 2018, vol. 65, pp. 411-419. DOI: 10.1134/S0040601518070054.
7. Myslenkov S.A., Markina M.Yu., Arkhipkin V.S., Tilinina N.D. Frequency of storms in the Barents Sea under modern climate conditions. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2019, no. 2, pp. 45–54 [in Russ.].
8. Nesterov E.S. Wind waves in the arctic seas (review). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 377, no. 3, pp. 19-41 [in Russ.].
9. Platonov V.S., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S., Kislov A.V. High-resolution modeling of the hydrometeorological fields over the Kara sea coastal regions in complex coastline conditions. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2022, no. 1, pp. 87-106 [in Russ.].
10. Plotnikov V.V., Vrazhkin A.N., Mezentseva L.I., Druz N.I., Vakul'skaya N.M., Dubina V.A. Variability of Hydrometeorological regime of seas of east Arctic sector (east Siberian, Chukchi) in the modern period. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 103-115 [in Russ.].
11. Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Climatic changes of ice navigation conditions along Ob Bay – the Bering Strait route. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika [Fundamental and Applied Hydrophysics]*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 65-75. DOI: 10.7868/S2073667319030080 [in Russ.].
12. Cabral I.S., Young I.R., Toffoli A. Long-Term and Seasonal Variability of Wind and Wave Extremes in the Arctic Ocean. *Front. Mar. Sci.*, 2022, vol. 9, pp. 80. DOI: 10.3389/fmars.2022.802022.
13. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., ... Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 2011, vol. 137 (656), pp. 553-597.
14. Hasselmann S., Hasselmann K., Allender J.H., Barnett T.P. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.*, 1985, vol.15, pp. 1,378-1,391.
15. Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, 102790 p. DOI:10.1016/j.coldregions.2019.102790.
16. Liu Q., Babanin A., Zieger S., Young I., Guan C. Wind and Wave Climate in the Arctic Ocean as Observed by Altimeters. *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, no. 22, pp. 7957-7975.
17. 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, pp. 648.
18. Stopa J., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F. Wave climate in the Arctic 1992-2014: seasonality and trends. *Cryosphere*, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 1605-1629.

19. Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07. Tech. Note 333, March 2019. NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019.

20. Wang X.L., Feng Y., Swail V.R., Cox A. Historical changes in the Beaufort-Chukchi-Bering seas surface winds and waves, 1971–2013. *J. Climate*, 2015, vol. 28, pp. 7457-7469.

21. Waseda T., Webb A., Sato K. et al. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic ocean. *Sci. Reports*, 2018, vol. 8, Article No. 4489.

22. Zieger S., Babanin A.V., Rogers W.E., Young I.R. Observationbased source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH. *Ocean Mod.*, 2015, vol. 96, pp. 2-25.

*Поступила 10.03.2022; одобрена после рецензирования 16.03.2023;
принята в печать 31.03.2023.*

*Submitted 10.03.2022; approved after reviewing 16.03.2023;
accepted for publication 31.03.2023.*