

УДК 551.465

РОСТ ШТОРМОВОЙ АКТИВНОСТИ В КАРСКОМ МОРЕ С 1979 ПО 2019 г. ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2021 г. С. А. Мысленков^{1,2,3,*}, В. С. Платонов¹,
К. П. Сильвестрова², член-корреспондент РАН С. А. Добролюбов¹

Поступило 01.03.2021 г.
После доработки 03.03.2021 г.
Принято к публикации 05.03.2021 г.

Проведен анализ штормовой активности в Карском море, основанный на данных моделирования ветрового волнения по модели WAVEWATCH III с 1979 по 2019 г. В качестве входных использовались данные о ветре из реанализов NCEP/CFSR/CFSv2. Вычисления выполнены на неструктурной сетке с разрешением от 700 м до 10 км. Дана оценка качества моделирования на основе сравнения с прямыми и спутниковыми измерениями. Выполнен анализ повторяемости случаев штормового волнения отдельно для каждого года. Установлено, что шторма с высотами волн более 3 м наблюдаются в среднем около 30 раз в год. Для штормов с высотой волн более 3–5 м наблюдается увеличение повторяемости в два раза с 1979 по 2019 г. Увеличение количества штормов связано в основном с уменьшением ледовитости моря. Анализ сезонной изменчивости штормовой активности показал, что наибольшее количество штормов наблюдается с июля по декабрь. Сильный положительный тренд на увеличение повторяемости штормов наблюдается в период октябрь–декабрь. В период январь–март из-за отсутствия льда с 2005 г. начали наблюдаться шторма, которые вносят существенный вклад в итоговый рост повторяемости штормов.

Ключевые слова: штормовая активность, Карское море, ветровые волны, моделирование волнения, сокращение площади морского льда

DOI: 10.31857/S2686739721060128

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует повышенный интерес к исследованию гидрометеорологических условий арктических морей, связанный с активным хозяйственным освоением данного региона: здесь идут активная разведка, добыча и транспортировка полезных ископаемых, развивается рыбный промысел, становится более интенсивным всесезонное судоходство. Одним из ключевых лимитирующих факторов для хозяйственной деятельности, судоходства, развития инфраструктуры береговой зоны, подверженных разрушениям в штормовых условиях, является ветро-волновой режим.

Для обеспечения гидрометеорологического обслуживания арктической инфраструктуры важное значение имеет исследование повторяемости экстремальных ветров и волн, их межгодовой изменчивости, а также и причин, приводящих к их возникновению.

Большинство публикаций, касающихся волнового климата Карского моря, выполнены с использованием результатов моделирования, либо на основе анализа спутниковых данных.

В работе [1] показаны основные особенности волнового климата и тренды для всей Арктики за период 1992–2014 гг. Отмечено, что площадь ледяного покрова уменьшается, а высота волн увеличивается. В статье [2] на основе спутниковых наблюдений (1996–2015 гг.) проведен анализ режимных характеристик волнения в Северном Ледовитом океане в летний период (август–сентябрь). Результаты [2] показывают, что в среднем скорость ветра и высота волн в Баренцевом и Карском морях сначала увеличивались с 1996 по 2006 г., а затем уменьшались до 2015 г.

Положительные тренды максимальной высоты значительных волн и скорости ветра показаны

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт океанологии имени П.П. Ширинова Российской академии наук, Москва, Россия

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

*E-mail: stasocean@gmail.com

для морей Лаптевых и Бофорта на основе 38-летнего реанализа в работе [3]. Но для Карского моря анализ трендов не был реализован.

Межгодовая изменчивость высоты волн 50 и 99 перцентилей в Карском море описана в [4]. Выполнена оценка линейных трендов высоты волн с 2005 по 2018 г., но эти тенденции не являются статистически значимыми для большинства областей. Средняя высота волн и высота 99 перцентилей показывают слабо положительные тренды в северо-восточной части Карского моря, но анализируемый период слишком короткий для оценки тренда. Положительный линейный тренд высоты значительных волн в зимние месяцы в Баренцевом море также отмечен в работе [5].

Однако во всех упомянутых исследованиях отсутствует глубокий анализ межгодовой изменчивости штормового волнения в Карском море, или такой анализ проведен на основе слишком коротких рядов.

С другой стороны, период 2000–2019 гг. характеризуется значительным потеплением климата и сокращением площади старого и однолетнего морского льда в Арктике [6] и появлением значительно большей свободной ото льда морской поверхности, чем раньше. Также на изменение ветро-волнового режима в Арктическом регионе влияет изменчивость притока теплых атлантических вод [7]. Изменяется количество циклонов и их траекторий [8], а также меняются повторяемость и траектории полярных мезоциклонов [9]. Небольшое увеличение суточных экстремумов скорости ветра в Карском море показано в работе [10]. Положительные тенденции средней и экстремальной скорости ветра в некоторых частях Арктического региона также отмечены в [11].

Существует еще ряд работ, посвященных исследованию непосредственно ветро-волнового режима Карского моря [1, 4, 12–14], но данных о многолетней изменчивости повторяемости конкретных событий, сопровождающихся штормовым волнением, в них не приведено. Во время штормов наблюдаются сильный ветер и большая высота волн, однако эти события встречаются не часто – 30–40 раз в год, поэтому показатели среднегодовой скорости ветра или высоты волн, приведенные в работе [4], не могут достоверно описать климатические тренды.

В связи с этим важно провести анализ повторяемости случаев штормового волнения и проанализировать тренды за длительный период времени, включая последнее десятилетие.

В нашей работе представлены ретроспективные расчеты ветрового волнения с высоким пространственным и временным разрешением. Получены новые данные о режимных и экстремальных характеристиках ветрового волнения и сделана оценка повторяемости случаев штормо-

вого волнения в Карском море за период с 1979 по 2019 г.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для расчета параметров ветрового волнения в Карском море использовалась спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III версии 6.07 [15]. Эта волновая модель учитывает нелинейные взаимодействия трех волн, характерные для закрытых и мелководных акваторий, эффекты обрушения и дифракции волн на малых глубинах, а также влияние морского льда.

Для генерации волн использованы схема ST6, для расчета нелинейных взаимодействий схема DIA, для учета влияния льда схема IC0. Для учета воздействия придонного трения используется схема JONSWAP, диссипация волновой энергии параметризуется в зависимости от отношения фазовой и групповой скоростей волн, а также глубины в точке. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений ($\Delta\theta = 10^\circ$), частотный диапазон σ – 36 интервалов от 0.03 до 0.843 Гц. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового баланса составляет 15 мин, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии 60 с, шаг по времени для передачи энергии по спектру 450 с.

При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 ч из реанализа NCEP/CFRSR (1979–2010) с пространственным разрешением $\sim 0.3^\circ$ и реанализа NCEP/CFRSv2 (2011–2019) с разрешением $\sim 0.2^\circ$. Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке, состоящей из 37 729 узлов. Данная сетка покрывает акваторию Баренцева и Карского морей, а также всю северную часть Атлантического океана (рис. 1). Для Карского моря шаг составляет 10 км в открытом море и 700 м у берега. Более подробное описание конфигурации модели и особенности проведения экспериментов изложены в работах [16–18].

Для оценки качества моделирования было проведено сравнение наших результатов с данными наблюдений за волнением, выполненных в 2012 г. в одной точке в центре Карского моря и опубликованных в Атласе [19], а также с данными спутников Cryosat и Saral на всей акватории Карского моря с 2010 по 2017 г. [18]. При сопоставлении высоты значительных волн по данным прямых измерений и по результатам моделирования получены коэффициенты корреляции ~ 0.94 , систематическая ошибка менялась от -0.07 до 0.08 м, среднеквадратическое отклонение 0.31 – 0.39 м. Результаты оценки качества волновой модели приведены в табл. 1.

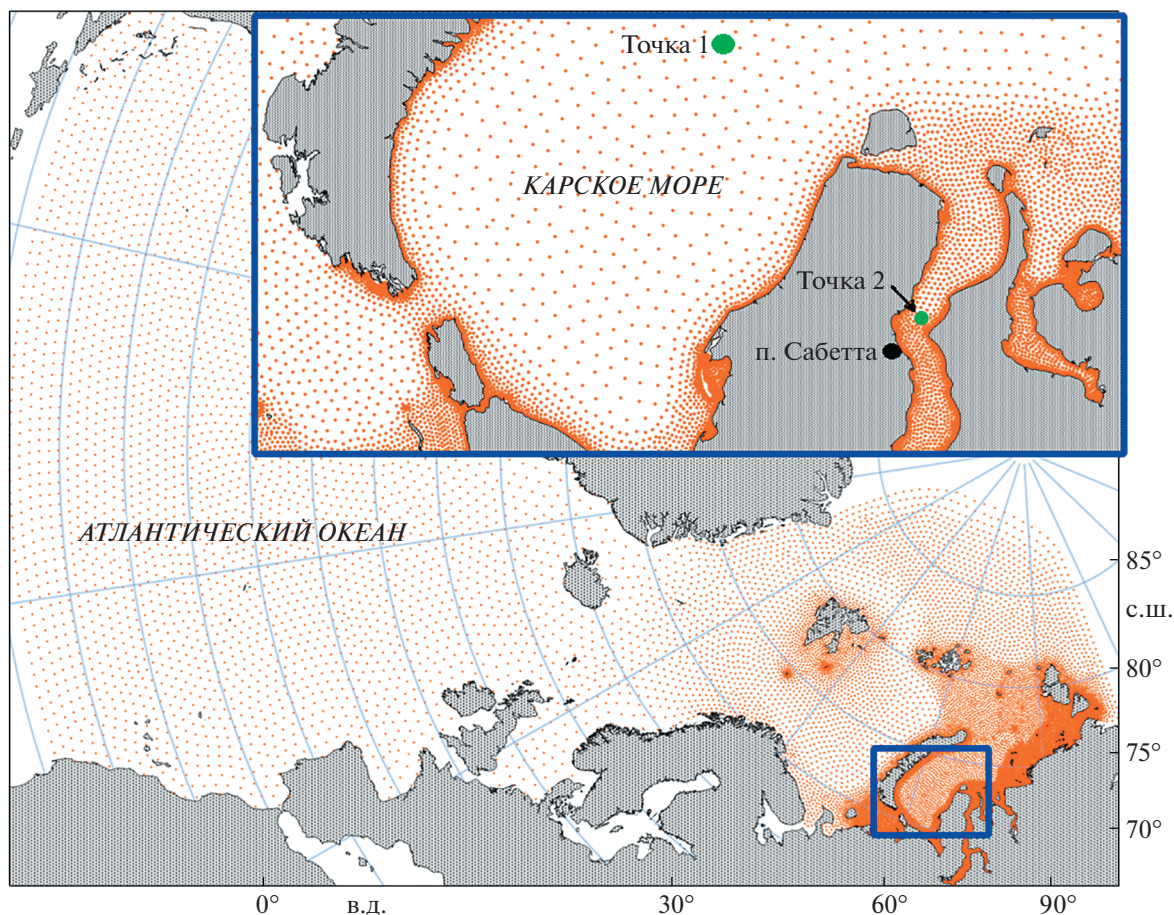


Рис. 1. Вычислительная сетка для моделирования волнения. В точке 1 проводился анализ изменчивости параметров ветра и льда (врезка). В точке 2 – анализ штормовой активности в Обской губе (врезка).

Анализ распределения систематической ошибки показал, что для диапазона высот волн от 3 до 6 м ошибка составляет ± 0.3 м. Для высот волн более 6 м наблюдаются большие отклонения, однако они вызваны не только качеством модели, но и малой длиной выборки.

В результате проведенных расчетов для каждого узла вычислительной сетки получены характеристики ветрового волнения с дискретностью 3 ч с 1979 по 2019 г. (всего 41 год). Исследование штормовой активности выполнено по методике Peak

Over Threshold (POT), ранее использованной для анализа штормовой активности, в том числе для Баренцева и Карского морей [17, 18, 20]. Методика расчета заключается в подсчете количества переходов исследуемой величины через заранее определенный критерий (в нашем случае от 1 до 6 м) за указанный промежуток времени (месяц, год). Критерий “отсечения” 3 м соответствует 99% перцентилю от всей выборки (1979–2019) для точек в открытом море в центральной части (с учетом ситуаций, когда море покрыто льдом) или

Таблица 1. Результаты оценки качества моделирования волнения

| Спутник/стат. параметр | Коэффициент корреляции | Систематич. ошибка, м | Среднеквадрат. ошибка, м | Индекс рассеяния | Объем выборки | Период сравнения |
|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|---------------|------------------|
| Cryosat | 0.89 | -0.07 | 0.39 | 0.3 | ~83 000 | 2010–2017 |
| Saral | 0.92 | 0.05 | 0.32 | 0.24 | ~74 000 | 2013–2017 |
| Sentinel | 0.91 | 0.07 | 0.37 | 0.27 | ~34 000 | 2016–2017 |
| Прямые измерения | 0.94 | 0.08 | 0.31 | 0.28 | ~400 | 2012–2012 |

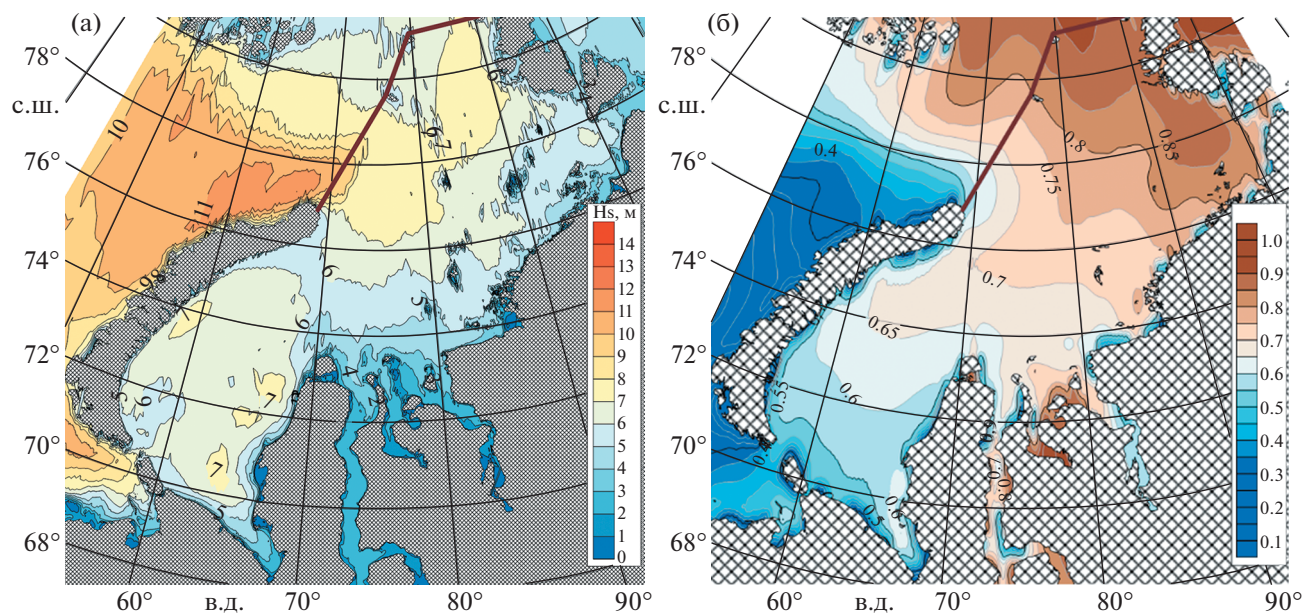


Рис. 2. Максимальная высота значительных волн по данным моделирования (а). Средняя многолетняя вероятность присутствия льда в долях единицы (б).

95% перцентилю для безледного периода. Для Обской губы был выбран минимальный критерий 1 м. Проверка качества работы данного алгоритма выполнена на основе визуального анализа анимации высоты волн по данным моделирования. Количество штормов, выделяемых визуально и при помощи программы, совпадает. Оценить реальное качество мы попытались на основе спутниковых данных: количество штормов с высотой волн более 5 м для 2016 г. по данным спутников составило 9 случаев, по данным моделирования 10 штормов, для 2017 г. 7 шт. по спутникам и 10 шт. по данным моделирования. Однако ряды спутниковых данных слишком короткие, чтобы выполнить более репрезентативный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе статистической обработки массива данных моделирования с 1979 по 2019 г. получены следующие климатические оценки: средняя многолетняя высота значительных волн в безледный период составляет около 1.1–1.3 м, максимальная высота значительных волн за период моделирования (41 год) составляет 10.1 м и наблюдается в северо-западной части моря, непосредственно у границы с Баренцевым морем (рис. 2а). В центральной части Карского моря у западного побережья полуострова Ямал максимальная высота значительных волн составляет 7.2 м. Максимальное значение среднего периода составляет 8.4 с для центральной части и 10 с для северной части моря. Средняя длина волн составляет 30 м для цен-

тральной части моря и 35–40 м для северной, а максимальная длина волн составляет от 160 до 300 м.

На основе метода POT выполнен анализ повторяемости случаев штормового волнения для акватории Карского моря отдельно для каждого года. Случаи с высотой волн более 3 м наблюдаются в среднем около 35 раз в год, более 4 м — около 15 раз (рис. 3а). Шторма с высотой волн более 6 м наблюдаются не каждый год. Максимальное количество штормов с высотами волн более 3 м было зафиксировано в 2018 г., в этом же году отмечаются максимумы и по другим градациям, в том числе абсолютный максимум для штормов более 6 м. Локальный максимум для штормов с высотой волн более 3 и 4 м отмечается в 1995 г. Минимальные значения по некоторым градациям отмечены в 1998 и 2003 г. Значимый линейный тренд на увеличение повторяемости штормов наблюдается практически для всех высот волн. Для случаев с высотой волн более 3–5 м с 1979 по 2019 г. наблюдалось увеличение повторяемости в два раза (рис. 3а). Также существует межгодовая изменчивость повторяемости штормового волнения (дисперсия составляет около 25–30% от среднего). Тренды по количеству штормов значимы на уровне $p = 0.05$ (по критерию Фишера) для пороговых значений 3–5 м и незначимы для 6 м.

Для объяснения причин межгодовой изменчивости повторяемости штормов были привлечены данные о ледовитости и ветровых условиях на акватории Карского моря. Средняя многолетняя вероятность присутствия льда приведена на рис. 2б и

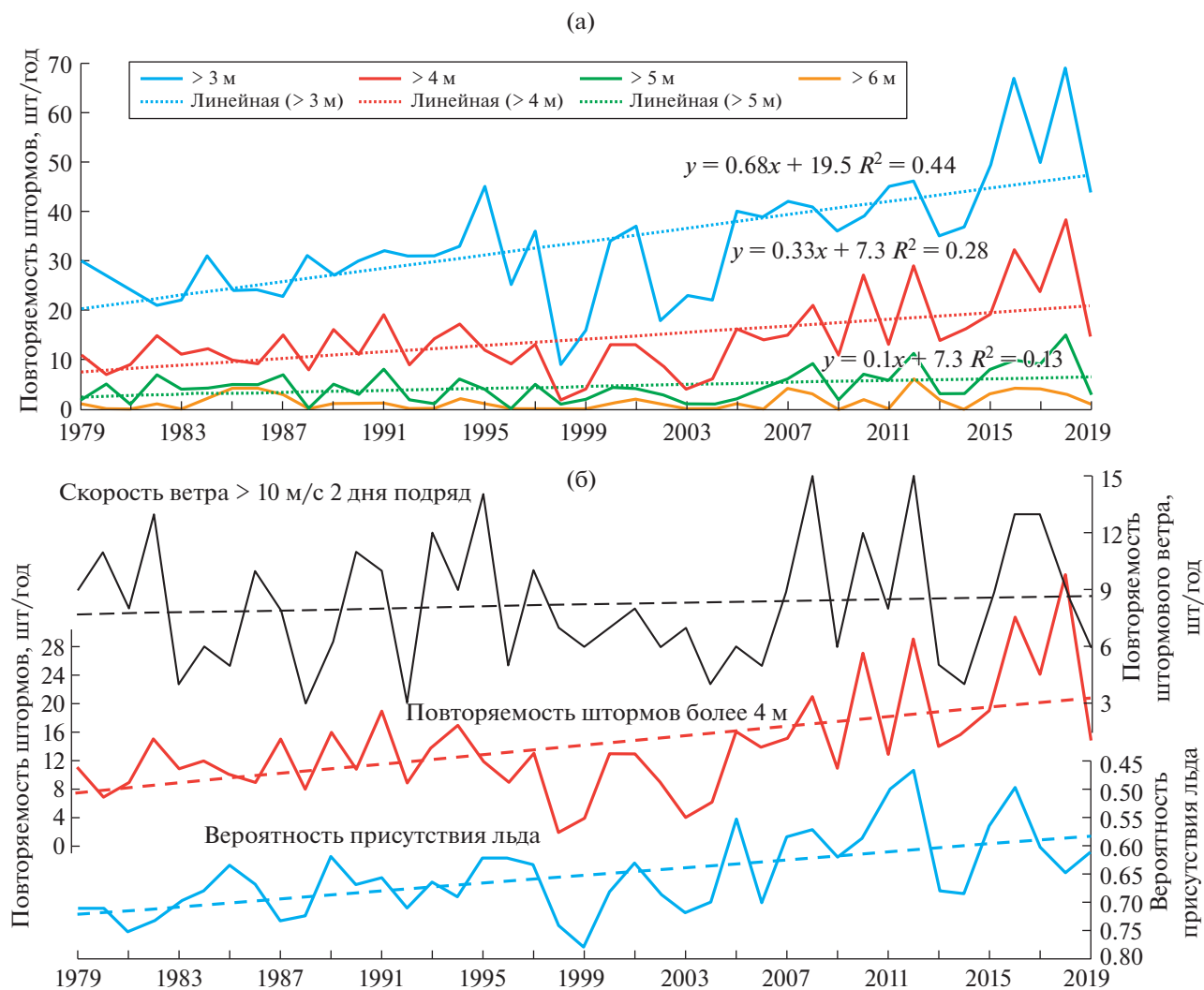


Рис. 3. Повторяемость случаев штормового волнения более 3–6 м с 1979 по 2019 г. (а). Повторяемость скорости ветра более 10 м/с двое суток подряд в точке 1, количество штормов с высотой волн более 4 м и вероятность наличия льда (процент от времени, когда есть лед ко всему году) – шкала обратная (б).

составляет около 0.75 для северной части и 0.55 для южной части Карского моря. Ледовитость оценивалась по повторяемости присутствия льда (отношение количества дней, когда наблюдался лед, к длительности всего года) для точки в центре Карского моря (точка 1 на рис. 1). Для оценки ветровых условий была проанализирована связь скорости ветра и высоты волн, на основе данных о среднесуточной скорости ветра из реанализов NCEP/CFSR/CFSv2 за период 1979–2019 гг. Эта связь нелинейна, так как на развитие волнения влияют много факторов, однако, на основании корреляционного анализа было выявлено, что максимальная корреляция 0.65 наблюдается при сопоставлении повторяемости штормов с высотой волн более 4 м с повторяемостью скорости ветра более 10 м/с в течение 2 сут подряд.

Уменьшение повторяемости присутствия льда в центральной части Карского моря составляет от 0.7 до 0.55 за весь период. Следовательно, если в 80-е годы 2/3 дней в году море было покрыто льдом, то к 2017-му году в этом же районе уже в течение полугода была открытая вода. Максимальная ледовитость наблюдалась в 1998–1999 гг., что привело к минимальным значениям в штормовой активности. При этом минимумы ледовитости, наблюдавшиеся в 2012 и 2016 г., по всей видимости, привели к увеличению штормовой активности в эти годы. Видно, что изменчивость повторяемости штормовых ветров довольно хорошо согласуется с повторяемостью штормов. Также на рис. 3б видно, что в годы с высокой ледовитостью (1998 и 2003 г.) уменьшается количество штормов, несмотря на средние значения по-

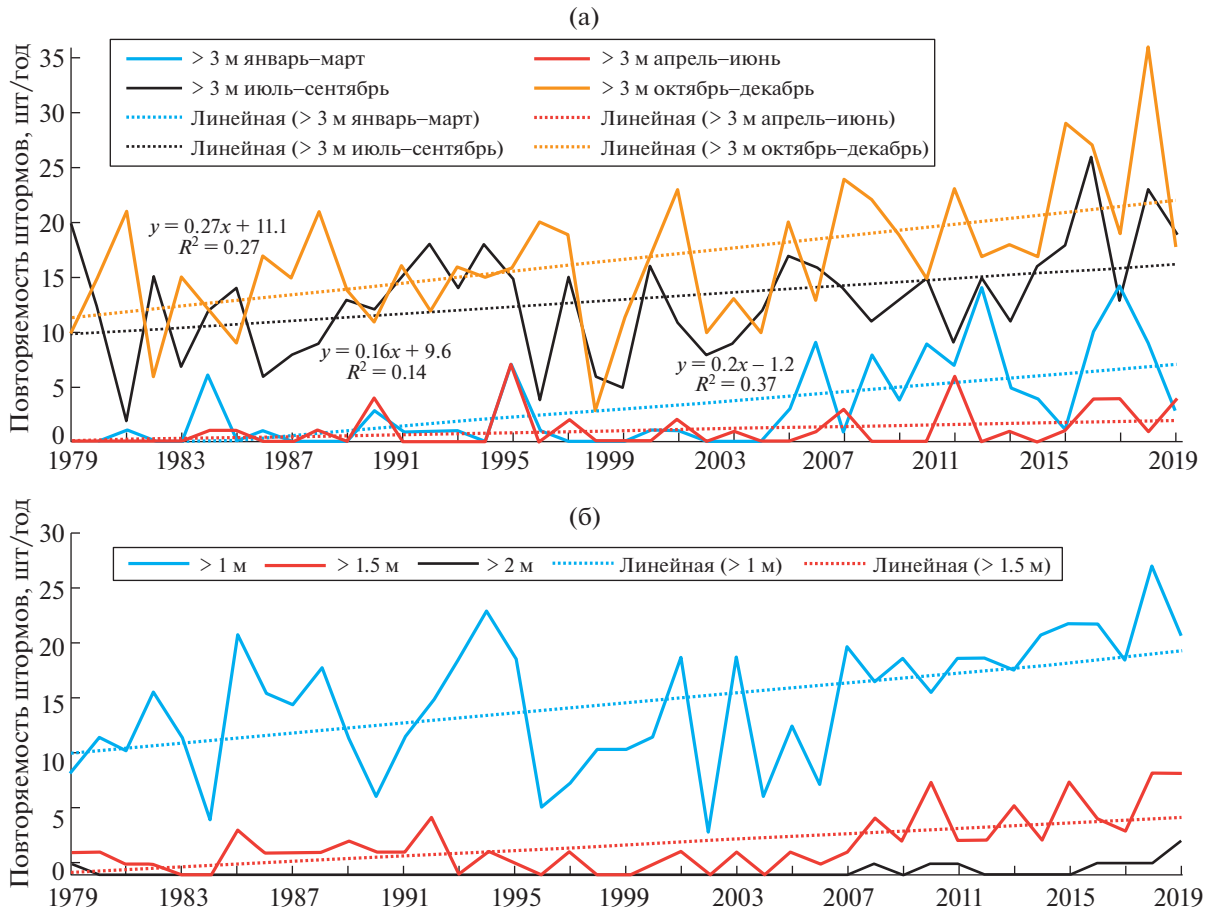


Рис. 4. Повторяемость случаев штормового волнения с высотами волн более 3 м по годам в разные сезоны (а). Повторяемость случаев штормового волнения более 1–2 м по годам в точке 2 (Сабетта) (б).

вторяемости ветровых событий. Значимость трендов оценивалась по критерию Фишера. Тренды по повторяемости штормов и вероятности льда оказались значимыми на уровне 0.05, а тренд по повторяемости интенсивных ветровых событий не является значимым.

Анализ повторяемости штормов проводился и для различных сезонов года, которые разделялись формально на периоды январь–март, апрель–июнь, июль–сентябрь, октябрь–декабрь. На рис. 4а представлена повторяемость штормов с высотой волн более 3 м для различных сезонов. Наибольшее количество штормов наблюдается с июля по декабрь, минимум в апреле–июне. В межгодовой изменчивости можно выделить следующие особенности: тренд на увеличение повторяемости штормов в период с июля по сентябрь слабый положительный, а в период октябрь–декабрь тренд сильный положительный. В период январь–март из-за отсутствия льда с 2005 г. появились шторма, которые в последние годы вносят существенный вклад в итоговый рост повторяемости штормов.

Особый интерес представляет исследование параметров волнения в Обской губе, в связи с интенсивным судоходством в районе п. Сабетта. Для точки 2 в районе п. Сабетта (местоположение обозначено на рис. 1) проведен анализ повторяемости штормов с 1979 по 2019 г. (рис. 4б). Обская губа сильно изолирована от Карского моря и разгон для ветровых волн небольшой, поэтому максимальная высота значительных волн по данным моделирования составила 2.9 м. Анализ повторяемости штормов был выполнен для критериев 1; 1.5; 2 м, которые существенно меньше, чем для открытой части моря.

Для всех критериев тренд положительный, однако, более корректно выделить период с 1979 по 2006 г., когда тренд был практически нулевой и период с 2006 по 2019 г. с сильным положительным трендом. Количество штормов с высотой волн более 1 м с 2006 г. увеличилось приблизительно в 3 раза. Шторма с высотой волн более 2 м стали наблюдаться с 2007 г.

По итогам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что наблюдается однозначный тренд на увеличение штормовой активности в Карском море. Этот тренд вызван в основном уменьшением ледовитости за последний 41 год, так как тренд на увеличение повторяемости интенсивных ветровых событий незначим. В период январь—март из-за отсутствия льда с 2005 г. появились шторма, которые в последние годы вносят существенный вклад в итоговый рост повторяемости штормов. Для Обской губы выделяется период с 1979 по 2006 г., когда тренд для штормов более 1 м был практически нулевой и период с 2006 по 2019 г. с сильным положительным трендом.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа С.А. Мысленкова и В.С. Платонова выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60147). Работа К.П. Сильвестровой осуществлялась в рамках Госзадания (№ 0128-2021-0002). Работа С.А. Добролюбова осуществлялась при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stopa J., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F.* Wave Climate in the Arctic 1992-2014: Seasonality and Trends // *Cryosphere*. 2016. 10 (4). P. 1605–1629.
2. *Liu Q., Babanin A., Zieger S., Young I., Guan C.* Wind and Wave Climate in the Arctic Ocean as Observed by Altimeters // *J. Climate*. 2016. 29 (22). P. 7957–7975.
3. *Waseda T., Webb A., Sato K., Inoue J., Kohout A., Penrose B.* Correlated Increase of High Ocean Waves and Winds in the Ice-free Waters of the Arctic Ocean // *Sci. Rep.* 2018. 8 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22500-9>
4. *Duan C., Dong S., Wang Z.* Wave Climate Analysis in the Ice-free Waters of Kara Sea // *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2019. Article 100719.
5. *Semedo A., Sušelj K., Rutgersson A., Sterl A.* A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40 // *J. Clim.* 2011. 24 (5). P. 1461–1479.
6. *Serreze M., Stroeve J.* Arctic Sea Ice Trends, Variability and Implications for Seasonal Ice Forecasting // *Philos. Trans. Roy. Soc. London*. 2015. 373A. 20140159. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0159>
7. *Ivanov V., Repina I.* The Effect of Seasonal Variability of Atlantic Water on the Arctic Sea Ice Cover // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2018. V. 54. P. 65–72.
8. *Tilinina N., Gulev S., Bromwich D.* New View of Arctic Cyclone Activity from the Arctic System Reanalysis // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 43. P. 1766–1772.
9. *Smirnova J.E., Golubkin P.A., Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Chapron B.* Polar Low Climatology over the Nordic and Barents Seas Based on Satellite Passive Microwave Data // *Geophysical Research Letters*. 2015. 42 (13). P. 5603–5609.
10. *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.
11. *Young I., Ribal A.* Multiplatform Evaluation of Global Trends in Wind Speed and Wave Height // *Science*. 2019. V. 364. P. 548–552. <https://doi.org/10.1126/science.aav9527>
12. Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей / Ред. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С. / Российский Морской регистр судоходства, СПб, 2009, 358 с.
13. *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.
14. *Kislov A., Matveeva T.* The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea // *Atmospheric and Climate Sciences*. 2020. V. 10. P. 339–356.
15. *Tolman H.* The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 6.07. 2019. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, available at: https://www.researchgate.net/publication/336069899_User_manual_and_system_documentation_of_WAVEWATCH_III_R_version_607 (last access: 18 December 2020).
16. *Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., et al.* 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.
17. *Мысленков С.А., Маркина М.Ю., Архипкин В.С., Тулинина Н.Д.* Повторяемость штормового волнения в Баренцевом море в условиях современного климата // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2019. № 2. С. 45–54.
18. *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. V. 13. 648. <https://doi.org/10.3390/w13050648>
19. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики Изд-во “Нефтяное хозяйство”, 2015. 128 с.
20. *Lopatoukhin L., Rozhkov V., Ryabinin V., Swail V., Boukhanovsky A., Degtyarev A.* Estimation of Extreme Wind Wave Heights // *WMO/TD-No. 1041*. 2000. JCOMM Technical Report No. 9.

INCREASING STORM ACTIVITY IN THE KARA SEA FROM 1979 TO 2019 BASED ON WAVE MODELING DATA

S. A. Myslenkov^{a,b,c,#}, V. S. Platonov^a,
K. P. Silvestrova^b, and Corresponding Member of the RAS S. A. Dobrolyubov^a

^a *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

^b *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c *Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: stasocean@gmail.com*

The paper presents a study of the storm activity in the Kara Sea. Wind waves were simulated with the WAVEWATCH III from 1979 to 2019. Wind data from NCEP/CFSR/CFSv2 reanalyses were used as forcing. The calculations were performed with a non-structural grid with a variable resolution from 700 m to 10 km. There is an estimation of the model quality based on comparison modeled data with direct and satellite measurements. The frequency of the high storm waves was analyzed separately for each year. Storms with SWH more than 3 m are observed about 30 times a year. For storms with SWH more than 3–5 m, there was a twofold increase in frequency from 1979 to 2019. The increase in the number of storms is mainly associated with a decrease in sea ice cover. The seasonal variability of storm activity depicts the largest number of storms from July to December. A strong positive trend for the storm frequency is observed from October to December. Due to the ice cover decrease since 2005, some storms were observed from January to March. These storms significantly influence to resulting increase of the frequency of the storms.

Keywords: storm activity, Kara Sea, wind waves, wave modeling, sea ice area reduction