

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-41-55>

УДК 551.466.31

## Повторяемость штормового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях

*S.A. Myslenkov<sup>1,3</sup>, E.E. Kruglova<sup>1,2</sup>, V.A. Bagatinsky<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *Институт океанологии имени П.П. Ширинова  
Российской академии наук, г. Москва, Россия;*

<sup>3</sup> *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
stasocean@gmail.com*

Представлен анализ повторяемости штормового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях по данным моделирования с 1979 по 2021 год с учетом ледовой обстановки. Повторяемость случаев штормового волнения рассчитана на основе методики выхода за пороговое значение. В качестве пороговых значений принималась высота значительных волн 2–5 м. Повторяемость штормового волнения с высотой волн более 2 м в море Лаптевых составляет в среднем около 20 раз в год, более 3 м – около 8 раз. В Восточно-Сибирском море случаи с высотой волн более 2 м наблюдаются в среднем около 23 раз в год. В 1990 году наблюдался локальный максимум количества штормов с высотой более 3 м в количестве 28 случаев. Случаи с высотой волн более 2 м в Чукотском море наблюдаются в среднем около 39 раз в год, более 3 м – около 24 раз. Тренды повторяемости штормов для всех рассматриваемых морей положительные и значимы.

*Ключевые слова:* море Лаптевых, Чукотское море, Восточно-Сибирское море, моделирование волнения, ветровое волнение, повторяемость штормового волнения, WAVEWATCH III

## Recurrence of storms in the Laptev Sea, East Siberian and Chukchi Seas

*S.A. Myslenkov<sup>1,3</sup>, E.E. Kruglova<sup>1,2</sup>, V.A. Bagatinsky<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

<sup>2</sup> *Shirshov Institute of Oceanology of Russian  
Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

<sup>3</sup> *Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
stasocean@gmail.com*

The analysis of number of storms in the Laptev Sea, East Siberian and Chukchi Seas according to modeling data from 1979 to 2021, taking into account the ice situation, is presented. The number of storm events is calculated based on the Peak Over Threshold method. The significant wave height of 2-5 m was taken as the threshold values. The number of storms with a wave height of more than 2 m in the Laptev Sea averages about 20 times a year, more than 3 m – about 8 times. In the East Siberian Sea, cases with a wave height of more than 2 m are observed on average about 23 times a year. In 1990, a local

maximum of 28 storms with a height of more than 3 m was observed. Cases with a wave height of more than 2 m in the Chukchi Sea are observed on average about 39 times a year, more than 3 m – about 24 times. The trends in number of storms for all the seas under consideration are positive and significant.

Keywords: Laptev Sea, Chukchi Sea, East Siberian Sea, wave modeling, wind wave, number of storms, WAVEWATCH III

## Введение

Освоение морских торговых маршрутов, проходящих через Арктику, становится все более актуальным в связи с различными геополитическими изменениями. Перевозка грузов из Азии в Европу через Северный морской путь (СМП) занимает существенно меньшее время, чем через Суэцкий канал [3]. Устойчивый тренд на увеличение продолжительности безледного периода в арктических морях [12, 13, 17] также способствует увеличению грузооборота через СМП. В 2023 году грузооборот через СМП достиг 36 млн тонн [9].

Подробные данные о режимных и экстремальных характеристиках ветрового волнения используются при планировании грузоперевозок. Как правило, суда, осуществляющие перевозки грузов по СМП, предназначены для эксплуатации в открытом океане и выдерживают высоту волн более 8 м. Однако высота волн более 2–4 м может оказаться критической при таких сложных операциях, как буксировка буровых платформ или перевозка опасных грузов. Критические значения по высоте волн указаны в правилах разработки и проведения морских операций Российского морского регистра судоходства [11]. Также анализ климатической изменчивости параметров ветрового волнения актуален в контексте исследований отступления вечной мерзлоты в Арктических морях [23] и разрушения берегов [22].

Анализ многолетней изменчивости параметров ветрового волнения в арктических морях на основе спутниковых данных и модельных расчетов для современного климата представлен в [2, 6, 10, 15, 16, 18, 24, 27]. В этих работах приведены оценки распределения режимных и экстремальных характеристик волнения на акватории морей. Обзор публикаций по ветровому волнению в Арктике представлен в [8].

В работе [5] при помощи спектральной волновой модели WAVEWATCH III и прогностического ветра CMIP5 выполнен прогноз изменения ветрового волнения в 21 веке.

Анализ трендов для средних значений высоты волн в Арктике за последние 30–40 лет на основе данных моделирования представлен в работах [15, 18, 24, 26, 27]. В море Лаптевых, Чукотском море и в море Бофорта на основе спутниковых данных есть статистически значимый тренд на увеличение высоты волн со скоростью 0.1–0.3 м за 10 лет [19]. Наиболее сильное увеличение среднегодовой высоты значительных волн наблюдается в Восточно-Сибирском море (от 0.4 до 1.4 м за 43 года в безледный период) [7].

Показано, что средние значения высоты волн в море Лаптевых и Чукотском море увеличиваются на 0.1–0.3 м за 10 лет. Тренды увеличения высоты волн в Чукотском море и море Бофорта за период 1971–2013 гг. показаны в [26].

Однако анализ повторяемости отдельных событий (случаев штормового волнения с определенной высотой) для морей восточного сектора российской Арктики ранее не проводился.

В данной работе представлены результаты анализа повторяемости случаев штормового волнения за период с 1979 по 2021 год в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях.

### 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 [25]. Более подробное описание данной реализации и результаты анализа ветрового волнения приведены в [7]. Оценки качества при использовании такой конфигурации модели приведены в [20].

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.

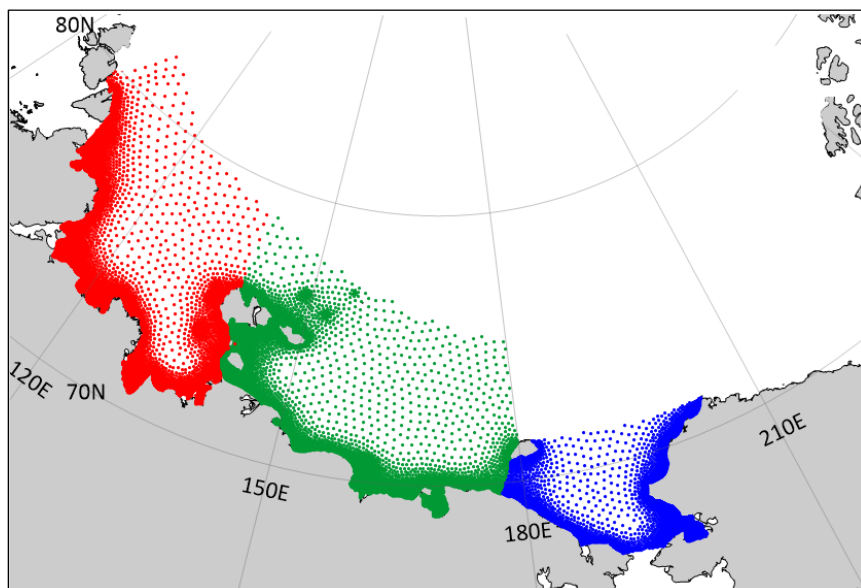
В результате проведенных расчетов для каждого узла вычислительной сетки получены характеристики ветрового волнения за каждые 3 часа с 1979 по 2021 год (всего 43 года).

Для анализа повторяемости штормового волнения в исследуемых морях использована методика Peak Over Threshold (POT), описанная в работе [1]. Ранее эта методика успешно применялась для анализа штормового волнения других морей России [21]. В данной работе под штормовым волнением (далее шторм) понимается событие, когда высота значительных волн на акватории моря превышает заданный критерий. Это определение является устоявшимся для исследования ветрового волнения в контексте анализа штормов и окон погоды [4].

Методика расчета основана на задании критерия (в нашем случае выбраны критерии высоты волн более 2–5 м), и проводится подсчет количества переходов исследуемой величины через критерий. Продолжительность шторма вычисляется как разность между временем конца и начала события. Отдельные шторма выделялись, если время между последовательными событиями превышения критерия превышало 9 часов.

Расчет повторяемости штормов производился для всей акватории каждого из исследуемых морей. Официальные границы морей были взяты из

[International Hydrographic Organization, [www.iho.int](http://www.iho.int)], а узлы вычислительной сетки, по которым производился анализ, представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Узлы вычислительной сетки для анализа повторяемости штормового волнения: море Лаптевых (красные точки), Восточно-Сибирское море (зеленые точки), Чукотское море (синие точки).

**Fig. 1.** Computational grid nodes for analyzing the recurrence of storm waves: Laptev Seas (red dots), East Siberian Sea (green dots), Chukchi Sea (blue dots).

Полученные данные о количестве штормов были исследованы на наличие трендов. В качестве трендов выступала модель линейной регрессии  $y = a_1x + a_0$ . Оценка трендов на значимость выполнена на основе критерия Стьюдента и критерия Фишера. При расчете критического значения критериев Стьюдента и Фишера был задан уровень значимости 5 %.

Для всех событий с высотой волн более 2 м также был рассчитан индекс силы шторма SPI (Storm Power Index), используемый в работе [14] и рассчитываемый как

$$SPI = H_s^2 \cdot Time, \quad (1)$$

где  $H_s$  – высота значительных волн;  $Time$  – продолжительность шторма в часах. Этот индекс позволяет оценить «энергетику» шторма, учитывая одновременно и высоту волн, и продолжительность события.

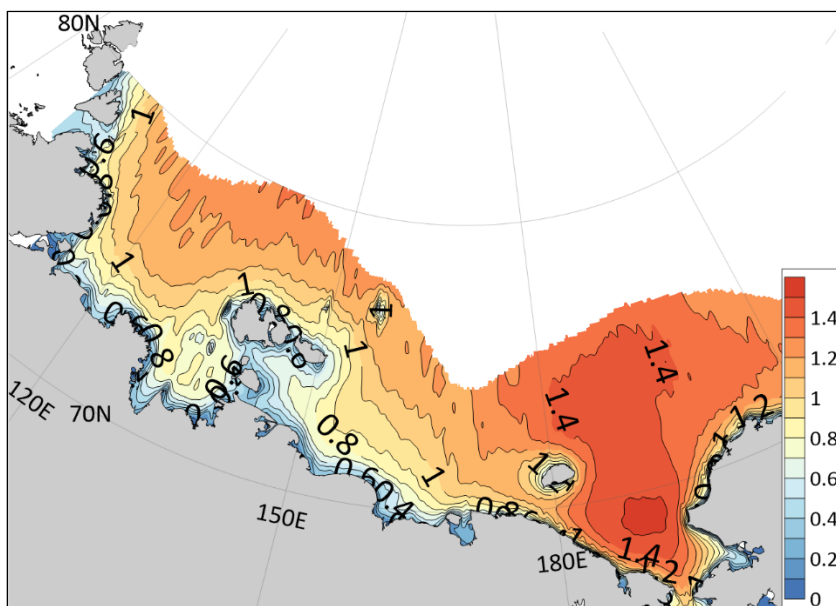
Дополнительно для анализа привлекались ежемесячные данные NOAA о площади морского льда (<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/regional-sea-ice/>). Эти данные осреднялись для календарного года. Также была рассчитана продолжительность безледного периода

по данным о концентрации морского льда из реанализа NCEP/CFSR/CFSv2. Расчет проводился для всех узлов реанализа в пределах каждого из морей, при этом учитывались только те сроки, когда не менее 30 % от площади моря было свободно ото льда.

95-й перцентиль скорости ветра был рассчитан для каждого года для точек, которые находились приблизительно в центре каждого из исследуемых морей.

## Результаты

Как было показано в [7], средняя многолетняя высота значительных волн в море Лаптевых составляет 0.1–0.3 м, в Восточно-Сибирском море – 0.1–0.2 м, а в Чукотском море – от 0.2 до 0.7 м. Однако в эти оценки входят нулевые значения высоты волн при наличии льда. На рис. 2 представлена карта среднемноголетней высоты волн для безледного периода (выборка ограничена узлами, где средняя многолетняя продолжительность безледного периода составляет не менее 1 месяца в году).



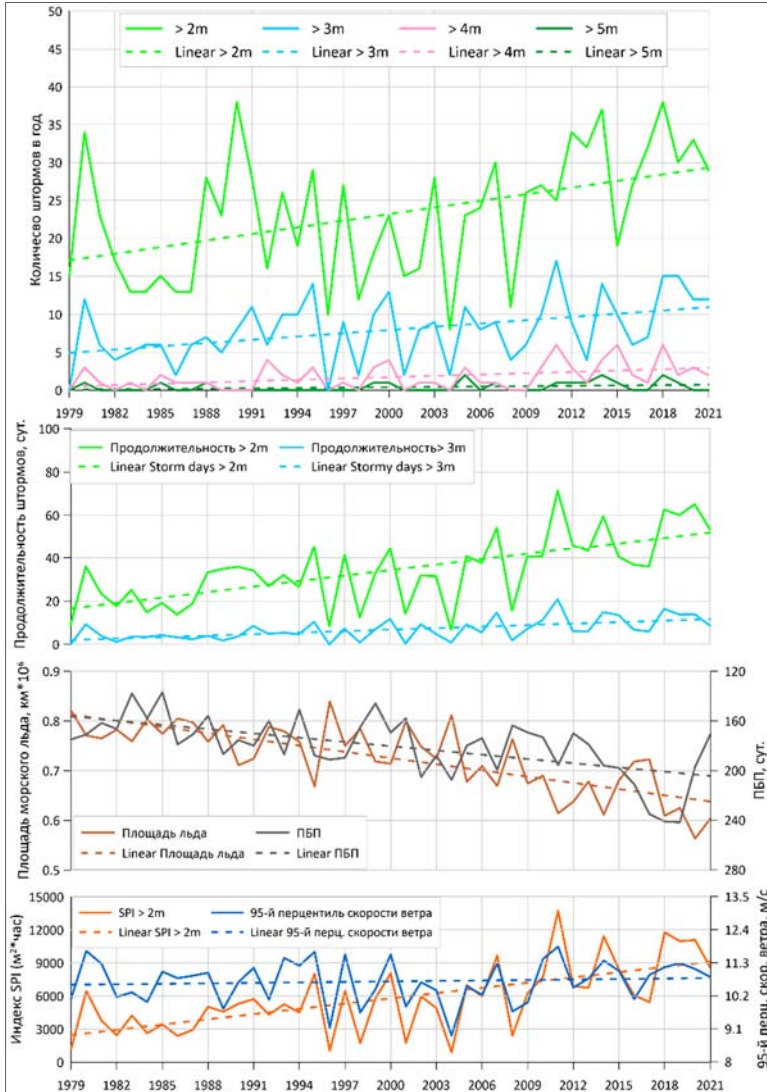
**Рис. 2.** Средняя многолетняя высота значительных волн (м) в безледный период.

**Fig. 2.** The average long-term significant wave height (m) in the ice-free period.

Максимальная высота значительных волн в безледный период наблюдается в Чукотском море и составляет около 1.5 м (рис. 2). В море Лаптевых и Восточно-Сибирском море высота волн составляет от 0.4–0.8 м в прибрежной зоне до 1–1.2 м в северной части морей.

## Море Лаптевых

Анализ количества штормов для акватории моря Лаптевых с 1979 по 2021 год представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** Количество и продолжительность штормов, площадь морского льда, индекс SPI, 95-й перцентиль скорости ветра в море Лаптевых с 1979 по 2021 год.

**Fig. 3.** The number and duration of storms, Sea Sea Ice Area, SPI index, 95th percentile of wind speed in the Laptev Sea from 1979 to 2021.

Шторма с высотой волн более 2 м наблюдаются в среднем 23 раза в год, а для высоты более 3 м – около 8 раз в год. Шторма с высотой более 4 и 5 м бывают редко и не каждый год. Линейные тренды для всех

критериев по количеству штормов положительные и значимы, кроме штормов более 5 м, что связано скорее всего с редким появлением таких событий.

Средняя суммарная за год продолжительность штормов с высотой волн более 2 м составляет 34 сут., для штормов более 3 м – 7 сут. Линейные тренды для продолжительности, как и для количества штормов, положительные, однако значимый тренд получен только для критерия более 2 м. Индекс SPI для штормов с высотой волн более 2 м также имеет положительный тренд и увеличился с 3000 м<sup>2</sup>·час до 9000 м<sup>2</sup>·час за исследуемый период.

Среднегодовая площадь льда в море Лаптевых имеет отрицательный тренд и сократилась с 0.8 до 0.65 млн км<sup>2</sup>. При проведении сравнения площади льда и количества штормов с высотой более 2 м в море Лаптевых был получен коэффициент корреляции -0.73, а для штормов с высотой более 3 м – -0.77, что говорит о высокой связи этих параметров. При сопоставлении количества штормов и продолжительности безледного периода коэффициент оказался еще выше: 0.79 и 0.67 соответственно. При сравнении продолжительности штормов с высотой более 2 м и площади льда был получен коэффициент корреляции -0.92. Анализ показал, что индекс SPI, а следовательно, и количество, и продолжительность штормов хорошо коррелируют с 95-м перцентилем скорости ветра (рис. 3). Однако положительного тренда по скорости ветра нет, а это значит, что тренды в количестве штормов обусловлены преимущественно уменьшением ледовитости.

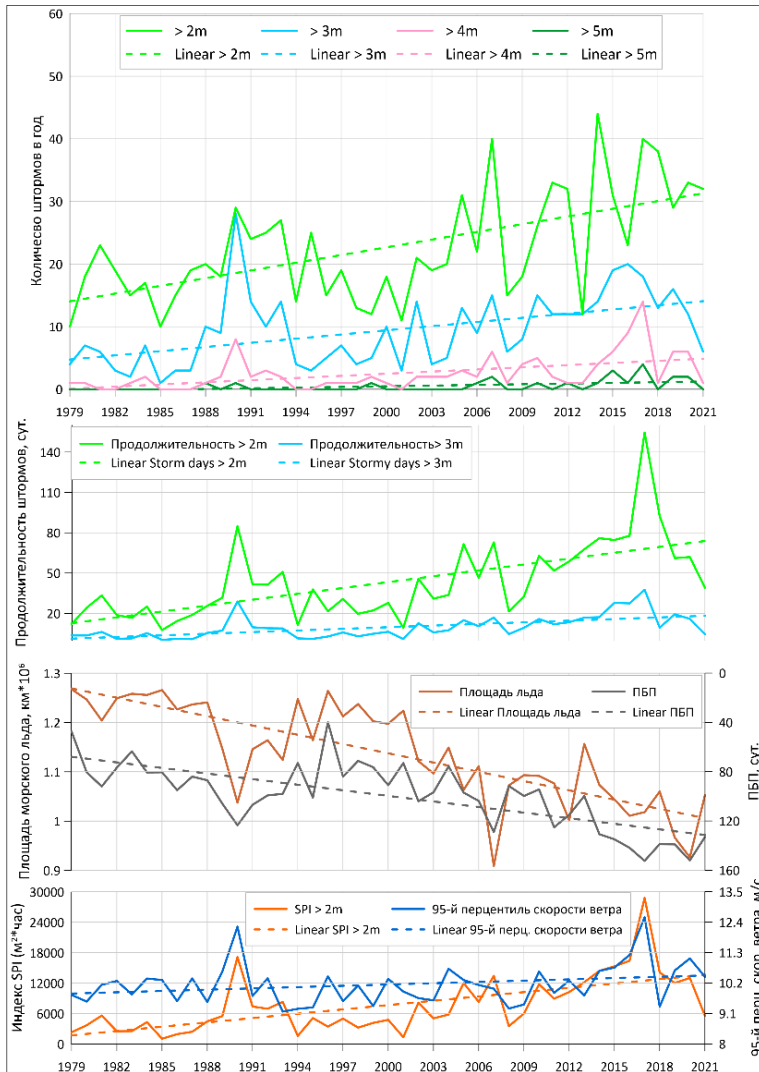
### *Восточно-Сибирское море*

В Восточно-Сибирском море шторма с высотой волн более 2 м наблюдаются в среднем 22 раза в год, а для высоты более 3 м – около 9 раз в год (рис. 4), что говорит о статистически сходном режиме ветрового волнения с морем Лаптевых. Шторма с высотой более 4 и 5 м бывают редко, однако в 2017 г. наблюдалось 14 штормов с высотой более 4 м. Линейные тренды для всех критериев по количеству штормов положительные и значимы для критериев 2–3 м.

Средняя суммарная за год продолжительность штормов с высотой волн более 2 м составляет 43 сут., для штормов более 3 м – 10 сут. Линейные тренды для продолжительности, как и для количества штормов, положительные, но не значимы. Индекс SPI для штормов с высотой волн более 2 м также имеет положительный тренд и увеличился с 2000 м<sup>2</sup>·час до 14000 м<sup>2</sup>·час за исследуемый период.

Среднегодовая площадь льда в Восточно-Сибирском море имеет отрицательный тренд и сократилась с 1.25 до 1.0 млн км<sup>2</sup>. В Восточно-Сибирском море при сравнении площади льда и количества штормов с высотой более 2 м получен коэффициент корреляции -0.78, а для штормов с высотой более 3 м – -0.71. Корреляция количества штормов и продолжительности безледного периода составляет 0.81 и 0.71 соответственно.

Как и для моря Лаптевых, в Восточно-Сибирском море 95-й перцентиль скорости ветра и индекс SPI хорошо коррелируют (рис. 4). В скорости ветра присутствует незначимый положительный тренд. Также хорошо видно, что максимум в продолжительности штормов с высотой более 2 м в 2017 году связан больше с увеличением скорости ветра, чем с уменьшением ледовитости.



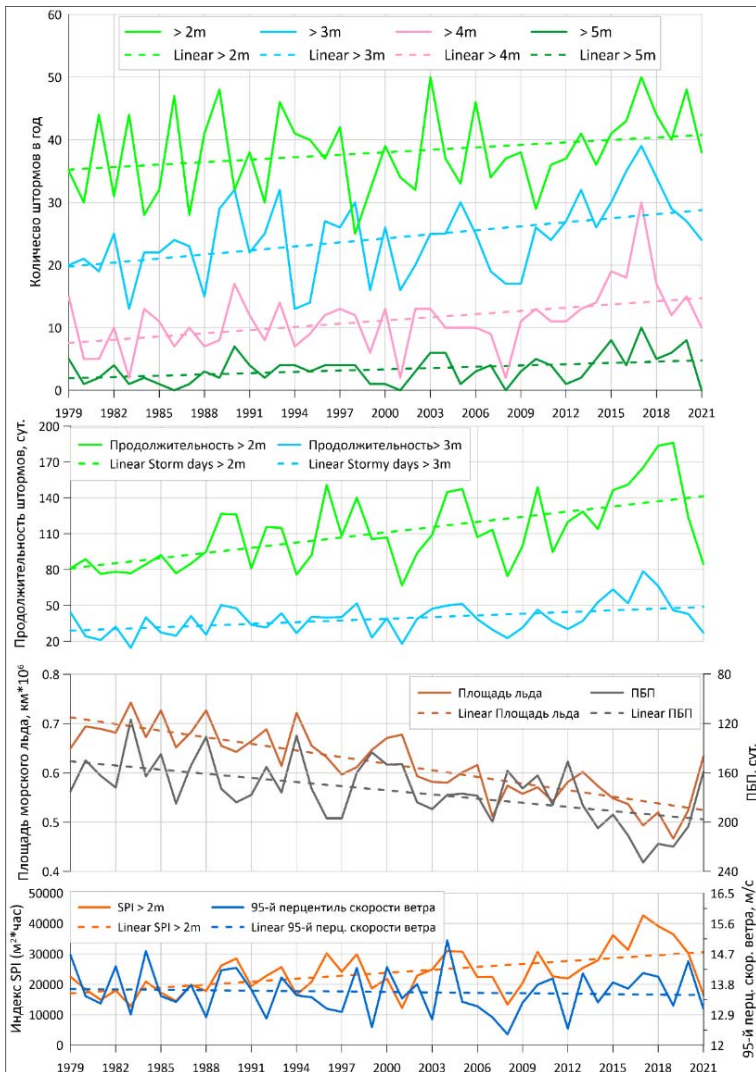
**Рис. 4.** Количество и продолжительность штормов, площадь морского льда, индекс SPI, 95-й перцентиль скорости ветра в Восточно-Сибирском море с 1979 по 2021 год.

**Fig. 4.** The number and duration of storms, Sea Sea Ice Area, SPI index, 95th percentile of wind speed in the East Siberian Sea from 1979 to 2021.



Чукотское море

В Чукотском море шторма с высотой волн более 2 м наблюдаются в среднем 43 раза, для высоты более 3 м – около 24 раз, для высоты более 4 м – 11 раз в год (рис. 5). Количество штормов в Чукотском море существенно больше, чем в других рассматриваемых морях, что связано с большей продолжительностью безледного периода в этом море.



**Рис. 5.** Количество и продолжительность штормов, площадь морского льда, индекс SPI, 95-й перцентиль скорости ветра в Чукотском море с 1979 по 2021 год.

**Fig. 5.** The number and duration of storms, Sea Sea Ice Area, SPI index, 95th percentile of wind speed in the Chukchi Sea from 1979 to 2021.

В Чукотском море, так же как и в Восточно-Сибирском, в 2017 году присутствует максимум в количестве штормов всех критериев. Линейные тренды для всех критериев по количеству штормов положительные и значимы для всех критериев.

Средняя суммарная за год продолжительность штормов с высотой волн более 2 м составляет 111 сут., для штормов более 3 м – 39 сут. Линейные тренды для продолжительности, как и для количества штормов, положительные и значимы для критериев 2–3 м. Индекс SPI для штормов с высотой волн более 2 м также имеет положительный тренд и увеличился с 16000 м<sup>2</sup>·час до 30000 м<sup>2</sup>·час за исследуемый период. Индекс SPI показывает, что за счет большей продолжительности и большего количества штормов волновой энергии в Чукотском море на порядок больше, чем в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море.

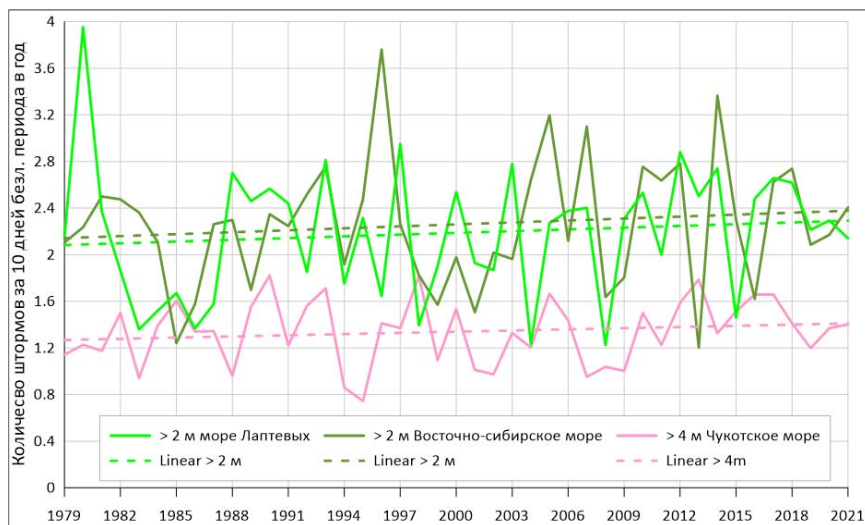
Среднегодовая площадь льда в Чукотском море имеет отрицательный тренд и сократилась с 0.7 до 0.5 млн км<sup>2</sup>. В Чукотском море количество штормов с высотой более 2 м практически не связано с изменением площади льда и продолжительностью безледного периода – коэффициент корреляции не превышает 0.4. Для штормов с высотой более 3 м коэффициент корреляции составляет -0.55 при сравнении с площадью льда и 0.62 – с продолжительностью безледного периода. При сравнении продолжительности штормов с высотой более 3 м и площади льда был получен коэффициент корреляции -0.68. При сравнении продолжительности штормов с высотой более 3 м и продолжительности безледного периода получен коэффициент корреляции 0.73.

95-й перцентиль скорости ветра хорошо коррелирует с индексом SPI (рис. 5), однако тренд по скорости ветра отрицательный, следовательно, тренды в количестве штормов обусловлены преимущественно уменьшением ледовитости.

Таким образом, статистическая связь ледовитости исследуемых морей с количеством и продолжительностью штормов достаточно высокая, что подтверждают высокие коэффициенты корреляции. Полученный результат свидетельствует только о том, что при увеличении продолжительности безледного периода происходит увеличение количества штормов. Однако хотелось бы выяснить, приводит ли уменьшение площади морского льда к развитию более высоких волн за счет увеличения разгона, о чем сделан вывод в работе [15] для арктических морей.

Для этого мы разделили количество штормов на продолжительность безледного периода. Это позволило нормировать выборку и проанализировать изменчивость количества штормов без влияния продолжительности безледного периода. На рис. 6 представлено изменение по годам количества штормов за 10 дней безледного периода для критериев более 2 м для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря и более 4 м для Чукотского моря. Эти критерии были выбраны из-за высокой корреляции с продолжительностью безледного периода. Тренды для всех критериев во всех морях

положительные, однако не значимы. Например, количество наблюдаемых штормов в море Лаптевых увеличилось с 2.1 до 2.3 за весь период исследования. Видно, что межгодовая изменчивость, не связанная с продолжительностью безледного периода, велика.



**Рис. 6.** Нормированное количество штормов за 10 дней безледного периода по годам в море Лаптевых, Восточно-Сибирском морях.

**Рис. 6.** The normalized number of storms for 10 days of an ice-free period by year in the Laptev Sea, the East Siberian and Chukchi Seas.

Очевидно, изменчивость количества штормов также зависит от межгодовой изменчивости скорости ветра, что было показано выше на рис. 3–5. Но предложенный анализ 95-го перцентиля скорости ветра для отдельных точек недостаточно полно описывает поле ветра над конкретным морем. Например, одна часть Восточно-Сибирского моря в некоторые годы вообще не освобождалась ото льда, тогда как в другой его части наблюдались шторма. Следовательно, анализ скорости ветра надо проводить для всего моря целиком, что является отдельной и достаточно сложной задачей.

### Заключение

На основе волновой модели WAVEWATCH III проведены расчеты количества штормов с высотой волн 2–5 м и их продолжительности для моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Выполнен анализ межгодовой изменчивости количества штормов, продолжительности штормов и индекса SPI. Приведена повторяемость штормов для каждого из рассматриваемых критериев.

Во всех исследуемых морях наблюдается положительный и значимый тренд для количества штормов и их продолжительности. Получены высокие коэффициенты корреляции (0.65–0.8) между количеством штормов, площадью льда и продолжительностью безледного периода. Прослеживается влияние межгодовой изменчивости скорости ветра на количество штормов. Тренды для количества и продолжительности штормов в море Лаптевых и Чукотском море преимущественно связаны с уменьшением ледовистости.

Анализ межгодовой изменчивости количества штормов нормированного на продолжительность безледного периода показал, что тренды остаются положительными, однако они не значимы.

### Благодарность

Работа Мысленкова С.А. и Багатинского В.А. выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-33. Работа Е.Е. Кругловой осуществлялась в рамках выполнения темы FMWE-2024-0016 государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

### Список литературы

1. Бухановский А.В., Иванов С.В., Лопатухин Л.И. Подходы, опыт и некоторые результаты исследования волнового климата океанов и морей. / Часть 1: Постановка задачи и входные данные // Вестник С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. 2005. Вып. 3. С. 52-74.
2. Вржжик А.Н. Режим волнения морей восточной Арктики в начале XXI столетия // Труды ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155. С. 164-177.
3. Зеленков М.Ю. Транспортно-логистическая система Северного морского пути: перспективы, проблемы и пути их решения // Арктика: экология и экономика. 2019. №4 (36). С. 131-140. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-131-140.
4. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение: Учебное пособие 2-е дополненное издание. СПб: Санкт Петербургский Государственный университет, 2012. 165 с.
5. Мохов И.И., Погарский Ф.А. Изменения режимов морского волнения в Арктическом бассейне при изменениях климата в XXI веке по модельным расчетам // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496, № 2. С. 189-193. DOI 10.31857/S2686739721020134.
6. 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.
7. Мысленков С.А. Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 1(387). С. 87-101. DOI 10.37162/2618-9631-2023-1-87-101.
8. Нестеров Е.С. Ветровое волнение в Арктических морях (обзор) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 19-41.
9. Объем перевозок по Северному морскому пути достиг 36 млн тонн грузов в 2023 году. ТАСС: Экономика: Объем перевозок по Северному морскому пути

достиг 36 млн тонн грузов в 2023 году [Электронный ресурс]. <https://tass.ru/ekonomika/19682861> (дата обращения 06.01.2023).

10. Плотников В.В., Вразжин 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. Правила разработки и проведения морских операций НД N 2-090601-010. Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, 2022. 142 с.

12. 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.

13. Шалина Е.В. Изменение ледовитости Северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 67. DOI 10.7868/S0205961415040090.

14. Amarouche K., Akpinar A. Increasing Trend on Storm Wave Intensity in the Western Mediterranean // Climate. 2021. Vol. 9, no. 1. P. 1-17. DOI: 10.3390/cli9010011

15. 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. 802022. DOI: 10.3389/fmars.2022.802022.

16. Francis O.P., Panteleev G.G., Atkinson D.E. Ocean wave conditions in the Chukchi Sea from satellite and in situ observations // Geophys. Res. Lett. 2011. Vol. 38. L24610. DOI: 10.1029/2011GL049839.

17. Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change // Atmosphere. 2023. Vol. 14. P. 409. <https://doi.org/10.3390/atmos14020409>

18. 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.

19. 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.

20. Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A., Kiseleva S., Arkhipkin V. Wind waves web atlas of the Russian seas // Water. 2023. Vol. 15, no. 11. P. 2036

21. Myslenkov S., Kруглова E., Medvedeva A. et al. Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Vol. 23, no. 3. P. ES3002.

22. Ogorodov S.A., Shabanova N.N., Kessel A.S., Baranskaya A.V., Razumov S.O. Changes of hydrometeorological potential of thermoabrasion on the Russian Arctic coasts // Moscow University Bulletin. Series 5: Geography. 2022. Vol. 1. P. 26-42.

23. Osadchiv A., Adamovskaya P., Myslenkov S., Dudarev O., Semiletov I. Satellite-Based Evaluation of Submarine Permafrost Erosion at Shallow Offshore Areas in the Laptev Sea // Remote Sens. 2023. Vol. 15. P. 5065. <https://doi.org/10.3390/rs15205065>

24. Sharmar V., Markina M. Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980-2019 // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21(2). P. 1-11. <https://doi.org/10.2205/2020ES000741>

25. 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.

26. 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.

27. 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.

### References

1. Buhanovskiy A.V., Ivanov S.V., Lopatuhin L.I. Podhody, opyt i nekotorye rezultaty issledovaniya volnovogo klimata okeanov i morey. Chast' 1: Postanovka zadachi i vkhodnye dannye. *Vestnik S.-Peterburg. un-ta., Ser. 7*, 2005, vol. 3, pp. 52-74 [in Russ.].

2. Vrazhkin A.N. Rezhim volneniya morey vostochnoy Arktiki v nachale XXI stoletiya. *Trudy VNIIGMI-MTSD*, 2017, vol. 155, pp. 164-177 [in Russ.].

3. Zelenkov M.Yu. Transport and logistics system of the Northern sea route: prospects, problems and solutions. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: ecology and economy]*, 2019, vol. 36, no. 4, pp. 131-140 [in Russ.].

4. Lopatuhin L.I. Vetrovoe volnenie: Uchebnoe posobie 2-e dopolnennoe izdanie. Saint Petersburg, Sankt Peterburgskiy Gosudarstvennyy universitet publ., 2012, 165 p. [in Russ.].

5. Mokhov I.I., Pogarskiy F.A. Variations in the Characteristics of Sea Waves in the Arctic Basin Caused by Climate Changes in the 21st Century Based on Model Simulations. *Dokl. Earth Sc.*, 2021, vol. 496, no. 2, pp. 164-167. DOI: 10.1134/S1028334X21020136.

6. Myslenkov, S.A., Platonov, V.S., Silvestrova, K.P., Dobrolyubov S. A. Increase in Storm Activity in the Kara Sea from 1979 to 2019: Numerical Simulation Data. *Dokl. Earth Sc.*, 2021, vol. 498, no. 2, pp. 502-508. DOI: 10.1134/S1028334X2106012X.

7. Myslenkov S.A. Modeling of the wind waves in the Laptev, East Siberian and Chukchi seas. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, vol. 387, no. 1, pp. 87-101. DOI 10.37162/2618-9631-2023-1-87-101 [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. Ob"em perevozok po Severnomu morskomu puti dostig 36 mln tonn Грузов в 2023 году. TASS: Экономика: Об"ем перевозок по Северному морскому пути достиг 36 млн тонн грузов в 2023 году. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/19682861> [in Russ.].

10. Plotnikov V.V., Vrazhkin A.N., Mezentseva L.I., Druz N.I., Vakulskaya 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 georesurov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]*, 2020, vol. 335, no. 2, pp. 103-115 [in Russ.].

11. Pravila razrabotki i provedeniya morskikh operatsiy ND N 2-090601-010. Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva, Sankt-Peterburg, 2022, 142 p. [in Russ.].

12. Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Climatic changes of ice navigation conditions along Ob Bay – the Bering Strait route. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 65-75. DOI: 10.7868/S2073667319030080 [in Russ.].

13. Shalina E.V. Izmenenie ledovitosti Severnykh morey Rossii i ocenka dostupnosti Severnogo morskogo puti po dannym sputnikovogo monitoring. *Issledovanie Zemli iz*

*kosmosa* [Earth research from space], 2015, no. 4, pp. 67. DOI: 10.7868/S0205961415040090 [in Russ.].

14. *Amarouche K., Akpinar A.* Increasing Trend on Storm Wave Intensity in the Western Mediterranean. *Climate*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1-17. DOI: 10.3390/cli9010011.

15. *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. 802022. DOI: 10.3389/fmars.2022.802022.

16. *Francis O.P., Panteleev G.G., Atkinson D.E.* Ocean wave conditions in the Chukchi Sea from satellite and in situ observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, vol. 38, L24610. DOI: 10.1029/2011GL049839.

17. *Ivanov V.* Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, pp. 409. DOI: 10.3390/atmos14020409.

18. *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, pp. 102790. DOI:10.1016/j.coldregions.2019.102790.

19. *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, vol. 29 (22), pp. 7957-7975.

20. *Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A., Kiseleva S., Arkhipkin V.* Wind waves web atlas of the Russian seas. *Water*, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 2036.

21. *Myslenkov S., Kruglova E., Medvedeva A. et al.* Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. ES3002.

22. *Ogorodov S.A., Shabanova N.N., Kessel A.S., Baranskaya A.V., Razumov S.O.* Changes of hydrometeorological potential of thermoabrasion on the Russian Arctic coasts. *Moscow University Bulletin. Series 5: Geography*, 2022, vol. 1, pp. 26-42.

23. *Osadchiev A., Adamovskaya P., Myslenkov S., Dudarev O., Semiletov I.* Satellite-Based Evaluation of Submarine Permafrost Erosion at Shallow Offshore Areas in the Laptev Sea. *Remote Sens.*, 2023, vol. 15, pp. 5065. DOI: 10.3390/rs15205065

24. *Sharmar V., Markina M.* Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980-2019. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 1-11. DOI: 10.2205/2020ES000741

25. *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.

26. *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.

27. *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.

Поступила 21.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024;  
принята в печать 10.04.2024.

Submitted 21.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024;  
accepted for publication 10.04.2024.

