

## УСИЛЕНИЕ ШТОРМОВОЙ АКТИВНОСТИ В ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Е. Е. Круглова<sup>1,2</sup>, С. А. Мысленков<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

<sup>3</sup> Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН (Москва, Российская Федерация)

### Для цитирования

Круглова Е. Е., Мысленков С. А. Усиление штормовой активности в восточном секторе российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 522—535. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-522-535.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2024 г.

*Работа посвящена исследованию штормовой активности в морях восточного сектора российской Арктики. Данные о параметрах ветрового волнения получены на основе модели WAVEWATCH III, о ветре, циклонах и концентрации морского льда — из реанализа NCEP/CFSR/CFSv2 за период с 1979 по 2021 гг. Получены оценки межгодовой и сезонной изменчивости количества и продолжительности штормов. Во всех исследуемых морях наблюдаются значимые тренды на увеличение количества штормов. Обнаружена взаимосвязь увеличения количества штормов с уменьшением площади морского льда, а также с увеличением количества циклонов. Выводы о климатических изменениях в штормовой активности важны для оценки перспектив развития Северного морского пути, а также для решения ряда фундаментальных и прикладных задач.*

**Ключевые слова:** ветровые волны, моделирование, арктические моря, шторма, повторяемость циклонов.

### Введение

В настоящее время в российской Арктике ведется активная хозяйственная деятельность, связанная с разведкой, добычей и транспортировкой полезных ископаемых, рыбным промыслом, судоходством. Активное развитие Северного морского пути (СМП) позволило увеличить грузооборот за 2023 г. до рекордных 36 млн т [1]. С 2019 по 2023 гг. общий грузооборот СМП не опускается ниже 30 млн т, причем в течение последнего десятилетия наблюдается стабильный рост грузоперевозок [2]. С конца 2023 г. действия йеменского движения «Ансар Алла» привели к существенному сокращению грузооборота через Суэцкий канал [3], что вынуждает западных грузоперевозчиков рассматривать другие логистические маршруты, в частности СМП. Также заметно повышение интереса зарубежных ученых к изменениям гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане [4; 5]. Перспективы и проблемы

развития транспортно-логистической системы Северного морского пути изложены в [6; 7].

С середины 1990-х годов наблюдается заметное уменьшение площади морского льда в Северном Ледовитом океане. Усиленное таяние и ускоренный вынос льда из окраинных морей приводят к увеличению площади открытых вод, что влияет на нижние слои атмосферы, поверхностный слой океана [8—11]. Несмотря на снижение уровня ледовитости более чем в 1,5 раза, значения размаха колебаний и среднеквадратического отклонения практически не изменились [12]. В связи с этим представляется важным получить новые данные о повторяемости штормового волнения в арктических морях России с учетом климатических изменений в последние десятилетия.

Существует ряд работ, посвященных изменчивости волнового климата Арктики в условиях меняющегося климата. Спутниковые данные показывают, что минимум площади морского льда наступает осенью, что совпадает с сезонным увеличением скоро-

сти ветра. Это создает более благоприятные условия для развития волн, что приводит к увеличению экстремальных высот волн [13; 14]. Увеличивается и эрозия берегов из-за совокупности повышения температуры, увеличения длительности безледного периода и высот волн [15].

Ожидается, что значительная высота волн и ее экстремумы значительно вырастут в некоторых районах Арктики к концу XXI в., что упоминается в ряде работ [16—19], основанных на данных CMIP5. Увеличение высоты волн прогнозируется в Восточно-Сибирском и Чукотском морях, тогда как в Гренландском, Норвежском и Баренцевом морях прогнозируется противоположная ситуация с уменьшением средних высот значительных волн. Ветровое волнение в морях восточного сектора российской Арктики весьма слабо освещено в отечественной литературе, что показано в обзорной статье [13].

Несмотря на наличие информации о высотах волн по данным спутниковой альтиметрии и их хорошую согласованность с натурными данными [20; 21], сезонные оценки для повторяемости штормов в восточном секторе российской Арктики не проводились. В [22] показано, что в море Лаптевых, Чукотском море и море Бофорта есть статистически значимый тренд увеличения высоты волн со скоростью 0,1—0,3 м за 10 лет.

Ранее нашей научной группой был выполнен анализ трендов среднегодовой высоты волн и количества штормов по данным моделирования в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях [23; 24]. Наиболее сильное увеличение среднегодовой высоты волн наблюдается в Восточно-Сибирском море (с 0,4 до 1,4 м за 43 года в безледный период).

В данной работе выполнен подробный анализ количества и продолжительности штормов, изменчивости безледного периода, а также повторяемости циклонов в восточном секторе российской Арктики на основе длительного периода моделирования. Основная цель работы — получить оценки динамики штормовой активности, сезонной и межгодовой изменчивости штормового волнения, продолжительности штормовых событий и связи этих событий с прохождением циклонов и изменчивостью безледного периода.

### Данные и методы

В работе использовалась база данных, описанная в [25]. Для расчета параметров ветрового волнения в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях использовалась спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III версии 6.07. При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 ч 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 36 176 узлов. Данная сетка покрывает акваторию моря Лаптевых, Чукотского и Восточно-Сибирского морей, а также часть Северного Ледовитого океана. Для прибрежной зоны исследуемых морей шаг сетки составляет около 800 м, а в открытой части — 10—15 км. Оценка качества волновой модели приведены в [25].

Выходные данные модели представляют собой характеристики ветрового волнения с дискретностью 3 ч с 1 января 1979 г. по 31 декабря 2021 г. Далее в работе использовалась высота значительных волн.

В настоящей работе под штормовым волнением (далее — шторм) понимается событие, при котором высота значительных волн на акватории моря превышает заданный критерий. Это определение является устоявшимся для исследования ветрового волнения в контексте анализа штормов и онок погоды [26]. Критерий для выделения штормов, как правило, определяется выходом показателя за 3 сигмы (среднеквадратическое отклонение), но он будет разным для каждой конкретной точки. В нашем случае выбран единый минимальный критерий в 2 м для всех морей. Под штормовой активностью мы понимаем межгодовую изменчивость повторяемости штормов, что по сути схоже с термином «циклоническая активность».

Для анализа повторяемости штормов использована методика Peak Over Threshold (POT). Ее применение упоминается в [23; 24; 27; 28]. Ранее эта методика применялась для Баренцева, Карского, Балтийского, Черного и Каспийского морей. Методика расчета такова: задается критерий (в нашем случае выбраны высоты волн от 2 до 5 м) и подсчитывается количество переходов исследуемой величины через критерий. При превышении критерия событие (шторм) начинается, при обратном переходе через критерий (вниз) событие заканчивается. Продолжительность шторма вычисляется как разница между моментами конца и начала события. Если время между двумя штормами составляет менее 9 ч (три срока), то считается, что это один длительный шторм. Если время между событиями превышает 9 ч — штормы считаются как два отдельных. Эта методика успешно использовалась для исследования штормовой активности в разных морях России [23; 24; 28].

На основе методики POT были вычислены количество штормов, их средняя и суммарная продолжительность за год и отдельно для каждого месяца исследуемого периода. Полученные данные о количестве штормов в год на основе многолетней выборки были исследованы на наличие трендов. В качестве тренда выступала модель линейной регрессии. Уравнение имеет вид  $y = kx + b$ . Для оценки качества модели линейной регрессии использовались критические значения критериев Стьюдента и Фишера (при проверке коэффициентов регрессии на значимость и адекватности модели). Уровень

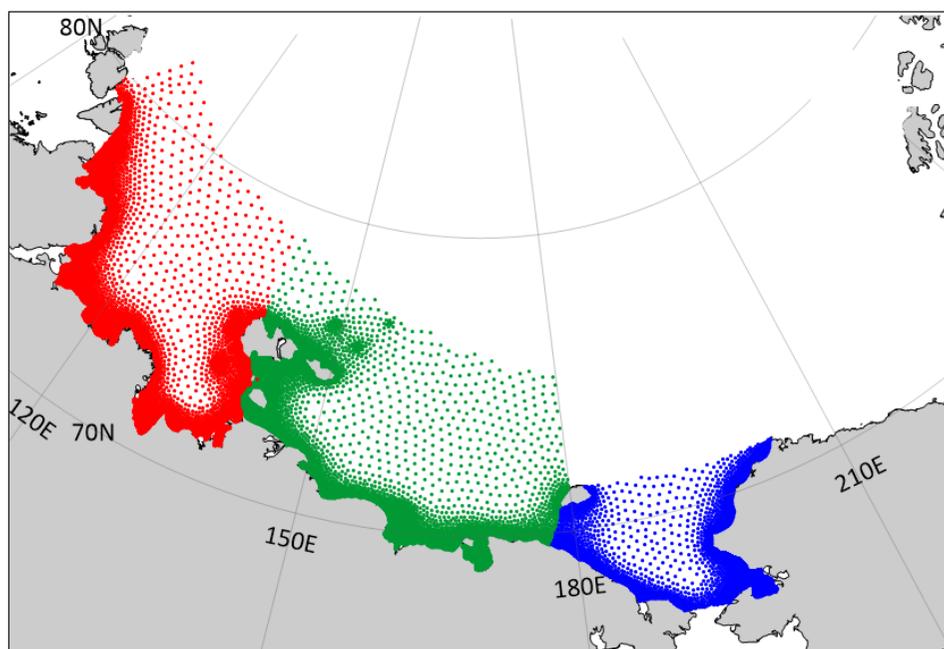


Рис. 1. Узлы вычислительной сетки для анализа повторяемости штормового волнения: Море Лаптевых – красные точки, Восточно-Сибирское море – зеленые точки, Чукотское море – синие точки. Составлено авторами

Fig. 1. Computational grid nodes for storm recurrence analysis: the Laptev Sea – red dots, the East Siberian Sea – green dots, the Chukchi Sea – blue dots. Compiled by the authors

значимости при нахождении критических значений равен  $p = 0,05$ . Также выполнялась оценка трендов отдельно по сезонам, которые в данном случае были приняты в качестве привычных календарных (весна — март-май, лето — июнь-август, осень — сентябрь-ноябрь, зима — декабрь-февраль).

Количество и продолжительность штормов для зимнего периода рассчитывались с учетом января-февраля текущего года и декабря предыдущего года. Так как для 1979 г. нет данных за декабрь 1978 г., а для 2021 г. — за январь-февраль 2022 г., данные для зимы нормировались на количество дней. Таким образом, для 1979 г. количество дней было 59, для 2021 г. — 31, для остальных годов в зависимости от високосности — 90 или 91.

Оценка количества штормов выполнена для всей акватории каждого из исследуемых морей. Официальные границы морей были взяты из [29], а узлы вычислительной сетки, по которым производился анализ, представлены на рис. 1.

Также для анализа привлекались данные о траекториях циклонов из базы данных [30], созданной на основе реанализа NCEP/CFSR/CFSv2 и содержащей информацию о характеристиках циклонов с 1979 по 2015 гг. В данной работе мы рассчитывали повторяемость циклонов для каждого моря отдельно за безледный период. Если хотя бы одна точка из траектории центра циклона находилась в пределах акватории моря, то этот циклон учитывался. Глубина, радиус и другие параметры циклонов не учитывались.

Продолжительность безледного периода для каждого моря рассчитывалась как количество дней,

когда минимум треть моря была свободна от морского льда. Выбранный параметр достаточно условен, но позволяет оценить период, когда могут наблюдаться потенциально ветровые волны высотой более 2 м. Использовались те же данные о концентрации льда, что и для моделирования ветрового волнения.

В рамках этой работы была выполнена валидация модели по данным дрейфующих волновых буев [31]. Буи дрейфовали севернее Чукотского моря и в море Бофорта (что попадает в вычислительную сетку) с 10 сентября по 2 ноября 2016 г., а общее количество измеренных значений высоты волн составило около 1500. Данные имеют хорошую согласованность, коэффициент корреляции  $R$  больше 0,9 при среднеквадратической ошибке (RMSE) ~ 0,4 м и систематической ошибке (BIAS) ~ 0,12—0,14 м.

## Результаты

### Межгодовая изменчивость штормов

Рассмотрим межгодовую изменчивость количества и продолжительности штормов в исследуемых морях. В море Лаптевых в среднем наблюдаются 23 шторма с высотой значительных волн более 2 м и 8 штормов с высотой значительных волн более 3 м (рис. 2). Значимые положительные линейные тренды найдены для штормов с критериями более 2 и более 3 м. Максимальная величина тренда для штормов с высотой волн 2 м — 3 шторма/10 лет. Растет также продолжительность штормов. Для суммарной продолжительности положительный значимый тренд наблюдается для штормов с высотой волн

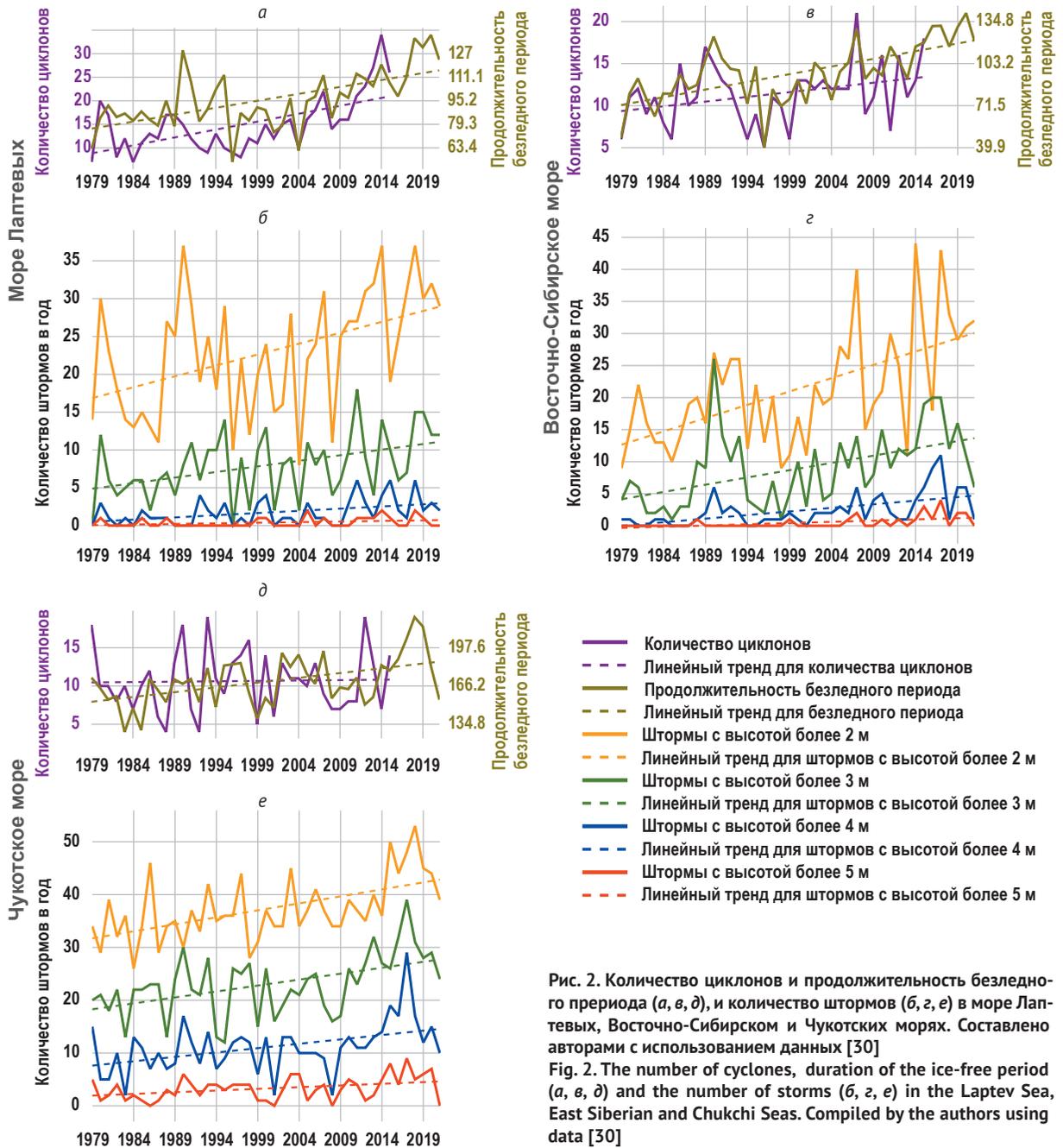


Рис. 2. Количество циклонов и продолжительность безледного периода (а, в, д), и количество штормов (б, г, е) в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотских морях. Составлено авторами с использованием данных [30]

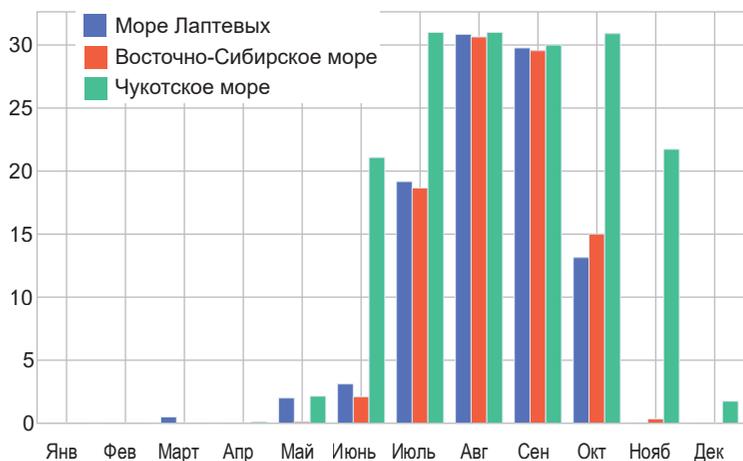
Fig. 2. The number of cyclones, duration of the ice-free period (a, в, д) and the number of storms (б, г, е) in the Laptev Sea, East Siberian and Chukchi Seas. Compiled by the authors using data [30]

более 2 м (величина тренда 8 сут/10 лет). Для средней продолжительности значимые положительные тренды характерны для штормов с высотами волн от 2 до 4 м (величины трендов от 0,16 до 0,1 сут/10 лет соответственно).

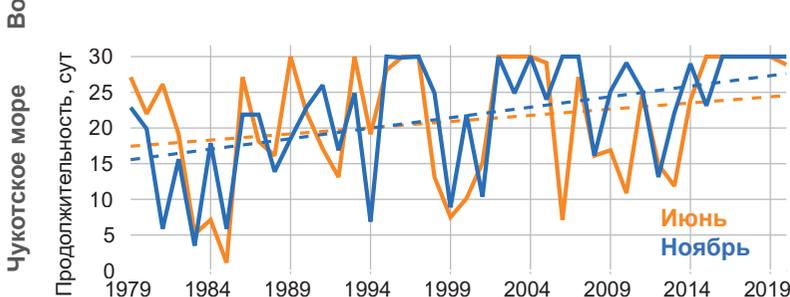
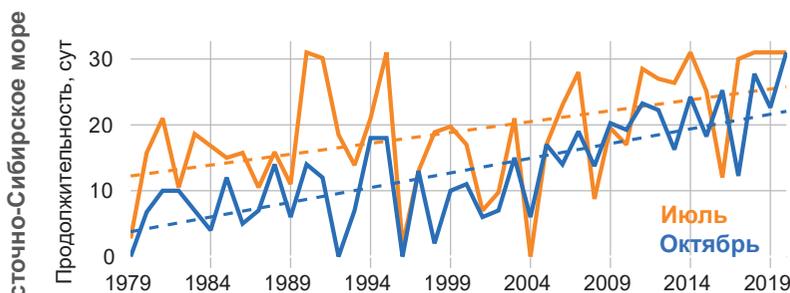
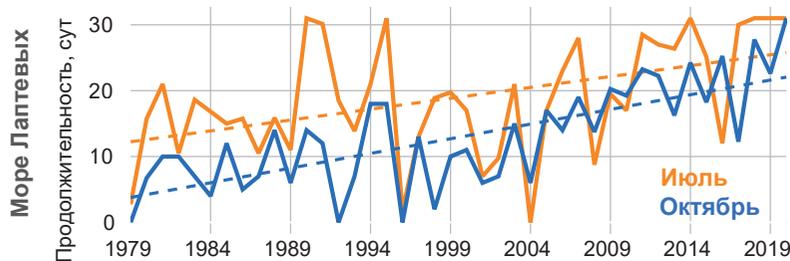
Для Восточно-Сибирского моря характерны в среднем 22 шторма с высотой волн более 2 м в год и 9 с высотами волн более 3 м. Значимые положительные тренды по количеству штормов характерны для волн более 2 м и более 3 м (величина тренда 4 и 2 шторма/10 лет соответственно). Для этих же критериев значимы тренды и по средней продолжительности — каждые 10 лет средняя продолжительность шторма с высотами значительных

волн более 2 м становится больше на 0,3 сут и на 0,21 сут — для высот волн более 3 м.

Наибольшее количество случаев штормового волнения наблюдается в Чукотском море. Среднее количество штормов с высотами волн более 2 м — 39 в год, а для высот волн более 3 м — 23. Значимые положительные тренды для количества штормов характерны для штормов всех критериев (от более 2 до более 5 м). Максимальная величина тренда для штормов с высотами волн более 2 и более 3 м — каждые 10 лет становится на 2 шторма больше. Для всех критериев имеются значимые положительные тренды для суммарной продолжительности штормов (максимальный тренд для



а



- Продолжительность безледного периода (месяц лета)
- - - Линейный тренд продолжительности безледного периода (месяц лета)
- Продолжительность безледного периода (месяц осени)
- - - Линейный тренд продолжительности безледного периода (месяц осени)

б

Рис. 3. Средняя продолжительность безледного периода (а) и количество дней в крайние месяцы безледного периода в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях (б). Составлено авторами  
 Fig. 3. Average duration of the ice-free period (а) and the number of days in the limit months of the ice-free period in the Laptev Sea, the East Siberian and Chukchi Seas (б). Compiled by the authors

волн с высотами более 2 м — 9 дней/10 лет), а для средней продолжительности только для волн с высотами более 2 м (с величиной 0,46 сут/10 лет).

*Межгодовая изменчивость циклонов и продолжительности безледного периода*

Положительный значимый тренд характерен и для продолжительности безледного периода в море Лаптевых. Величина тренда около 10 сут/10 лет. Тренд для количества циклонов тоже положителен и значим — 3 циклона/10 лет. Так как количество циклонов оценивалось только для безледного периода, вполне логично, что при большей продолжительности безледного периода более вероятно увеличение количества циклонов, следовательно, эти два параметра связаны между собой.

Максимальная корреляция составляет 0,79 и 0,84 и наблюдается соответственно между продолжительностью безледного периода (июль и октябрь) и количеством и суммарной продолжительностью штормов с высотами значительных волн более 2 м. Максимальная корреляция (0,63) наблюдается между количеством циклонов (в апреле) и количеством штормов с высотами волн более 4 м. Наблюдается также высокая корреляция (0,61) между количеством циклонов летом и количеством и суммарной продолжительностью штормов с высотами волн более 2 м.

Как и в море Лаптевых, в Восточно-Сибирском море наблюдается положительный значимый тренд для продолжительности безледного периода (11 дней/10 лет) и для количества циклонов (1 циклон/10 лет).

В Восточно-Сибирском море максимальная корреляция составляет 0,77 и 0,79 и наблюдается соответственно между продолжительностью безледного периода (октябрь) и количеством и суммарной продолжительностью штормов с высотами значительных волн более 2 м. Макси-

мальная корреляция между количеством циклонов (в декабре) и количеством штормов с высотами волн более 2 м составляет 0,54.

Положительный значимый тренд характерен и для продолжительности безледного периода в Чукотском море. Величина тренда 8 сут/10 лет. Тренд для количества циклонов незначим.

В Чукотском море максимальная корреляция между продолжительностью безледного периода (в ноябре) наблюдается с суммарной продолжительностью штормов с высотами волн более 2, 3 и 4 м (коэффициент корреляции — 0,72, 0,66 и 0,62 соответственно). Коэффициент корреляции между циклонами и штормами не превышает 0,55, максимальный наблюдается между количеством циклонов осенью и количеством штормов с высотами волн более 3 м.

Таким образом, можно сделать вывод, что во всех морях наблюдаются рост штормовой активности, и тренды для количества и продолжительности

штормов значимы. В море Лаптевых и Восточно-Сибирском море присутствует корреляционная связь количества циклонов и продолжительности безледного периода с количеством штормов. Для Чукотского моря связь с количеством циклонов слабая, и тренд в количестве циклонов отсутствует.

*Продолжительность безледного периода в отдельные месяцы*

Рассмотрим сначала продолжительность безледного периода в разные сезоны года. На рис. 3 видно, что для морей Восточной Арктики характерно практически постоянное присутствие льда в зимне-весенний период. В августе и сентябре практически всегда открытая вода наблюдается в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, а в Чукотском море также в июле и октябре. Для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в июле и октябре продолжительность безледного периода составляет около 15 сут, в то время как для Чукотского моря

**Таблица 1. Анализ трендов количества и продолжительности штормов в разные сезоны. Цифрами обозначены величина значимых трендов (в шт./год для количества штормов и циклонов, в сут/год для продолжительности штормов и длительности безледного периода) и среднее количество исследуемой величины**

**Table 1. Analysis of trends in the number and duration of storms in different seasons. The numerals indicate the magnitude of significant trends (in pcs/year for the number of storms and cyclones, in days/year for the duration of storms and the duration of the ice-free period) and the average amount of the studied value**

Море	Сезон	Наименование тренда	Штормы				Продолжительность безледного периода, сут		Количество циклонов	
			Высота волн более 2 м		Высота волн более 3 м		Среднее значение	Величина тренда	Среднее значение	Величина тренда
			Среднее значение	Величина тренда	Среднее значение	Величина тренда				
Море Лаптевых	Весна	Число штормов	0,49	0,02	0,05	0,00	~0	~0	0,05	~0
		Суммарная продолжительность	0,32	0,15	0,04	0,00				
		Средняя продолжительность	0,12	0,01	0,04	0,00				
	Лето	Число штормов	12,40	0,13	3,20	0,43	52,03	0,45	6,57	0,03
		Суммарная продолжительность	14,80	0,25	2,40	0,06				
		Средняя продолжительность	1,20	0,01	0,65	0,01				
	Осень	Число штормов	10,00	0,14	5,00	0,12	45,46	0,62	4,67	0,08
		Суммарная продолжительность	17,00	0,60	4,20	0,17				
		Средняя продолжительность	1,60	0,03	0,78	0,02				

Море	Сезон	Наименование тренда	Штормы				Продолжительность безледного периода, сут		Количество циклонов	
			Высота волн более 2 м		Высота волн более 3 м		Среднее значение	Величина тренда	Среднее значение	Величина тренда
			Среднее значение	Величина тренда	Среднее значение	Величина тренда				
Восточно-Сибирское море	Весна	Число штормов	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	~0	0,70	0,07
		Суммарная продолжительность	0,26	-0,01	0,00	0,00				
		Средняя продолжительность	0,09	0,00	0,00	0,00				
	Лето	Число штормов	10,00	0,21	2,90	0,20	53,60	0,45	8,10	0,20
		Суммарная продолжительность	13,40	0,30	2,20	0,03				
		Средняя продолжительность	1,50	0,02	0,60	0,01				
	Осень	Число штормов	11,00	0,19	6,00	0,20	53,60	0,44	6,00	0,08
		Суммарная продолжительность	23,00	0,82	6,80	0,80				
		Средняя продолжительность	2,00	0,04	1,00	0,04				
Чукотское море	Весна	Число штормов	1,00	0,09	0,00	0,06	2,31	0,21	0,08	0,01
		Суммарная продолжительность	2,70	0,16	0,20	0,01				
		Средняя продолжительность	1,20	0,50	0,10	0,00				
	Лето	Число штормов	18,00	0,14	6,00	0,05	82,94	0,21	5,50	0
		Суммарная продолжительность	28,60	0,34	5,50	0,10				
		Средняя продолжительность	1,60	0,01	0,86	0,01				
	Осень	Число штормов	16,00	-0,03	15,20	0,08	82,94	0,33	5,00	0
		Суммарная продолжительность	57,30	0,56	27,70	0,14				
		Средняя продолжительность	3,60	0,30	1,80	0,00				

**Примечание.** Зеленым цветом выделены статистически значимые тренды.

**Note.** Statistically significant trends are highlighted in green.

продолжительность безледного периода и в июне, и в ноябре доходит до 20 сут. Именно за счет более продолжительного безледного периода штормов в Чукотском море существенно больше.

Относительно межгодовой изменчивости безледного периода для отдельных месяцев необходимо отметить, что в море Лаптевых тренды для июля и октября положительны и практически одинаковы

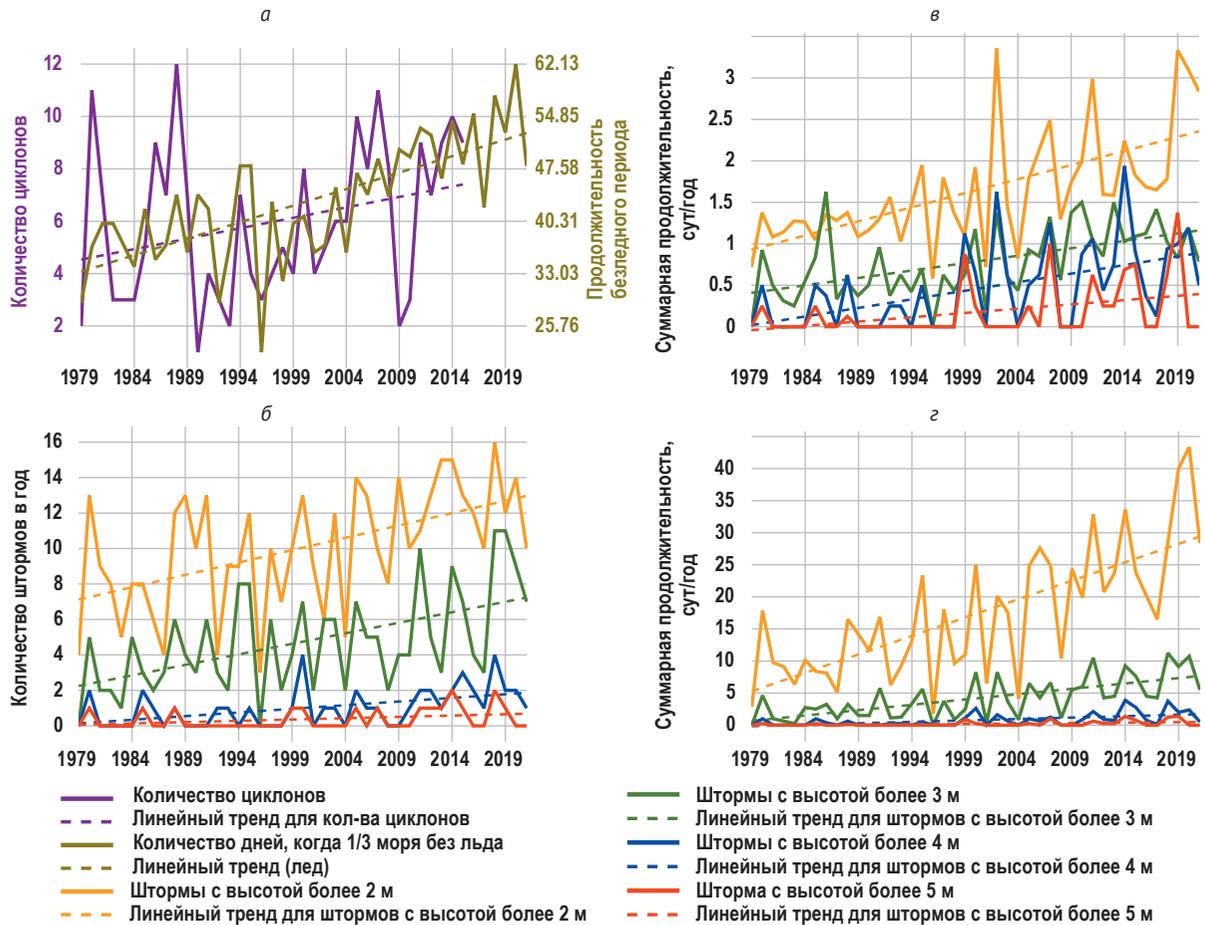


Рис. 4. Количество циклонов и продолжительность безледного периода (а), количество штормов (б), средняя и суммарная продолжительность штормов (в, г) осенью в море Лаптевых. Составлено авторами с использованием данных [30]  
 Fig. 4. The number of cyclones and the duration of the ice-free period (a), the number of storms (б), the average and total duration of storms (в, г) in autumn in the Laptev Sea. Compiled by the authors using data from [30]

по величине (см. рис. 3б). В Восточно-Сибирском море тренд для октября больше, чем для июля, а в Чукотском море тренд в ноябре больше, чем для июня. Это свидетельствует о том, что смещение безледного периода падает преимущественно на осень.

*Сезонная изменчивость количества и продолжительности штормов*

Обобщенные результаты анализа трендов по количеству и продолжительности штормов, а также по продолжительности безледного периода и количеству циклонов в морях Восточной Арктики представлены в табл. 1. Данные по зимнему сезону не приведены в связи с крайне низкими средними значениями и отсутствием статистически значимых трендов. Значимые тренды по количеству штормов наблюдаются в основном летом и осенью во всех морях. По продолжительности безледного периода выделяется Чукотское море, где значимый тренд присутствует только осенью. По количеству циклонов значимые тренды присутствуют осенью в море Лаптевых и летом в Восточно-Сибирском море.

Во всех трех анализируемых морях наблюдается отсутствие статистически значимых трендов весной и зимой. Среднее количество штормов весной для каждого моря не превышает одного шторма в год, а в зимнее время в море Лаптевых и Восточно-Сибирском до конца XX в. штормы практически не наблюдались. Зимой в Чукотском море на протяжении всего периода моделирования наблюдаются штормы с высотами волн более 2—4 м. Статистически значимых трендов не найдено, однако при сохранении тенденции и увеличения периода моделирования для штормов с высотами волн более 4 и 5 м тренды могут стать статистически значимыми. Это наблюдение хорошо согласуется с результатами анализа прогностических данных CMIP5 [18].

Далее более подробно рассмотрим межгодовую изменчивость исследуемых параметров для лета и осени, так как именно в эти периоды наблюдаются положительно значимые тренды штормов и наличие взаимосвязи с продолжительностью безледного периода и циклонами.

Летом в море Лаптевых в среднем 12 штормов с высотами волн более 2 м и средней продолжи-

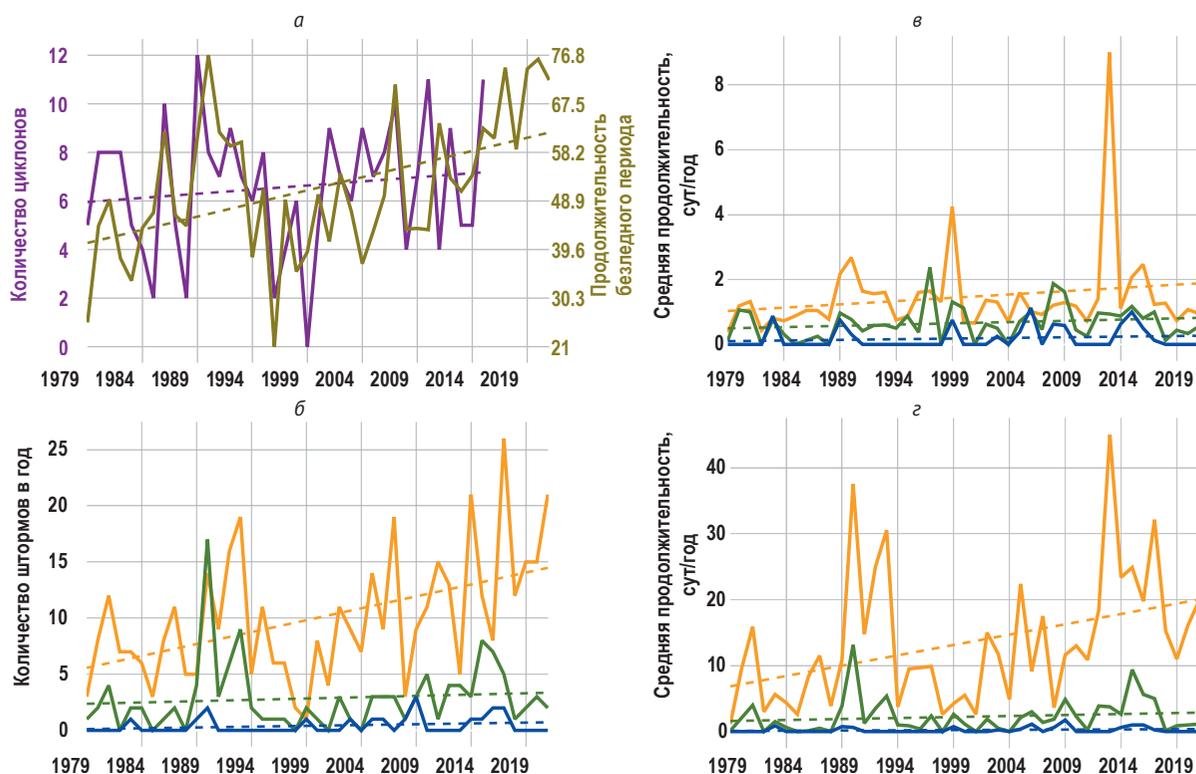


Рис. 5. Количество циклонов и продолжительности безледного периода (а), количество штормов (б), средняя и суммарная продолжительности штормов (в, г) летом в Восточно-Сибирском море (легенда приведена на рис. 4). Составлено авторами с использованием данных [30]

Fig. 5. Number of cyclones and duration of the ice-free period (a), number of storms (б), average and total durations of storms (в, г) in summer in the East Siberian Sea (the legend is shown in Fig. 4). Compiled by the authors using data from [30]

тельностью ~1,2 сут. Положительный значимый тренд наблюдается для критерия  $\geq 2$  м — величина тренда составляет 1,3 шторма/10 лет. Также наблюдается увеличение продолжительности — растет суммарная продолжительность для штормов с высотами волн  $\geq 2$  и больше 3 м, с величинами трендов 2,5 и 0,6 сут/10 лет. На 0,1 сут/10 лет увеличивается средняя продолжительность штормов с высотами волн более 3 м.

Осенью наблюдается меньшее среднее количество штормов с высотами волн более 2 м, чем летом (10), однако средняя продолжительность достигает 1,6 сут (рис. 4). Значимые положительные тренды найдены для количества штормов с высотами волн более 2 и 3 м, величины трендов ~1,4 и ~1,2 шторма/10 лет. Для наименьшего критерия также характерно увеличение суммарной продолжительности (6 сут/10 лет) и средней продолжительности (0,3 сут/10 лет). Для штормов с высотами волн более 3 м увеличивается только средняя продолжительность штормов (0,2 сут/10 лет).

Летом в Восточно-Сибирском море в среднем 10 штормов с высотами волн более 2 м и средней продолжительностью ~1,5 сут (рис. 5). Хотя количества и продолжительности штормов схожи с летними штормами в море Лаптевых, в Восточно-Сибирском море значимый тренд наблюдается только для

количества штормов с критерием  $\geq 2$  м — 2 шторма/10 лет. Продолжительность штормов также увеличивается, но статистически значимый тренд наблюдается только для суммарной продолжительности штормов с высотами волн более 2 м, величина тренда 3 сут/10 лет.

Осенью среднее количество штормов с высотами волн более 2 м равно 11, однако средняя продолжительность достигает ~2 сут. Среднее количество штормов с высотами волн, равными и более 3 м, — 6, а с высотами волн более 4 м — 2. Значимые положительные тренды найдены для количества штормов с высотами волн более 2 м, величина тренда — 2 шторма/10 лет. Наблюдаются также положительные значимые тренды для средней продолжительности штормов с высотами волн 2 м и более 3 м. Величины трендов 0,4 и 0,2 сут/10 лет.

Летом в Чукотском море в среднем 18 штормов с высотами волн более 2 м и средней продолжительностью ~38 ч. Штормов с высотами волн более 3 м в среднем 6 со средней продолжительностью 21 ч. Положительный тренд характерен для волн с высотами более 2 м, величина — 1,4 шторма/10 лет. Растет суммарная продолжительность для штормов с высотами волн более 2 и более 3 м, величина значимых трендов — 3 и 1 сут/10 лет.

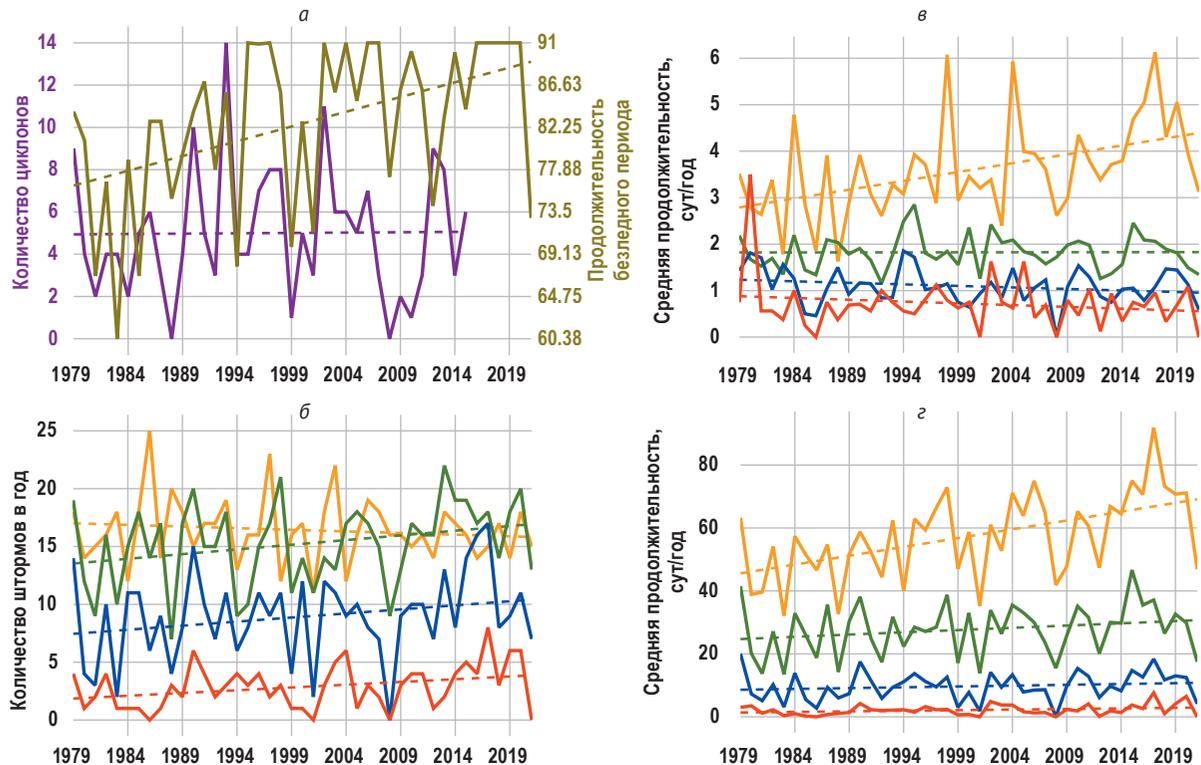


Рис. 6. Количество циклонов и продолжительность безледного периода (а), количество штормов (б), средняя и суммарная продолжительности штормов (в, г) осенью в Чукотском море (легенда приведена на рис. 2). Составлено авторами с использованием данных [30]

Fig. 6. The number of cyclones and the duration of the ice-free period (а), the number of storms (б), the average and total durations of storms (в, г) in autumn in the Chukchi Sea (the legend is shown in Fig. 2). Compiled by the authors using data from [30]

В среднем 16 штормов с критерием высоты волн более 2 м и 15 штормов с критерием более 3 м наблюдаются в осенний период (рис. 6). Средняя продолжительность — 3,6 и 2 сут соответственно. Осенний период, самый штормовой для анализируемых морей, в Чукотском отличается наличием в среднем 9 штормов с высотами волн более 4 м и 3 штормов с высотами волн более 5 м, что делает его самым неблагоприятным для морского транспорта и инфраструктуры. Интересно наличие положительного значимого тренда для количества штормов в летний период и отрицательного значимого тренда для этого же критерия штормов в осенний период ( $-0,3$  шторма/10 лет). Статистически значимые тренды наблюдаются для суммарной продолжительности штормов с высотами волн более 2 м (каждые 10 лет продолжительность увеличивается на 6 сут). Можно отметить, что, несмотря на наибольшие средние значения количества штормов в Чукотском море в сравнении с остальными морями, изменчивость в этот период сравнительно невелика, что в то же время не делает его более благоприятным для морского транспорта и инфраструктуры.

Полученные данные могут быть применены для определения режимных и экстремальных значений высоты волн при планировании грузоперевозок по СМП. Суда, работающие на СМП, в основном пред-

назначены для эксплуатации в открытом океане и способны выдерживать высоту волн свыше 8 м. Тем не менее высота волн от 2 до 4 м может стать критической при выполнении сложных операций, таких как буксировка буровых платформ или транспортировка опасных грузов. Критические значения высоты волн прописаны в правилах разработки и проведения морских операций Российского морского регистра судоходства [32].

#### Сезонная изменчивость продолжительности безледного периода и количества циклонов

В море Лаптевых летом наблюдается рост продолжительности безледного периода, величина тренда составляет 4,5 сут/10 лет. Коэффициент корреляции между количеством штормов с высотами волн более 2 м и продолжительностью безледного периода летом составляет 0,72, а с количеством циклонов — 0,52.

Для осеннего периода помимо положительного значимого тренда по продолжительности безледного периода (величина тренда 6 сут/10 лет) увеличивается также количество циклонов на 0,8 шт./10 лет. Коэффициент корреляции между количеством штормов с высотами волн более 2 м и продолжительностью безледного периода летом составляет 0,75, а с количеством циклонов — 0,5.

Интересно, что минимальное количество штормов с высотами волн более 2 м наблюдалось в 1996 и 2004 гг., хотя и количество циклонов, и продолжительность безледного периода в эти годы имеют значения, близкие к средним. Следовательно, необходимо учитывать какие-то дополнительные факторы, например, направление ветра, что для морей со сложной конфигурацией берега и наличием островов может иметь значение.

В Восточно-Сибирском море летом наблюдается положительный значимый тренд для безледного периода, его продолжительность увеличивается на 4,5 сут/10 лет. Также наблюдается положительный и значимый тренд для количества циклонов — каждые 10 лет количество циклонов увеличивается на 2. Коэффициент корреляции между длительностью безледного периода летом и количеством штормов с высотами волн более 2 м составляет 0,7. Высоких корреляций между штормами и циклонами не найдено.

На рис. 5 видно, что количество и продолжительность штормов реагируют на увеличение или уменьшение количества циклонов (1990, 1999 гг.), но в некоторые годы эта связь не отслеживается (1996, 1998 гг.).

Положительный значимый тренд по льду в осенний период в Восточно-Сибирском море почти равен величине летнего — 4,5 сут каждые 10 лет. Есть высокие коэффициенты корреляции между количеством и суммарной продолжительностью штормов с высотами волн более 2 м и длительностью безледного периода в октябре (0,74 и 0,86 соответственно).

Каждые 10 лет в осенний период продолжительность безледного периода в Чукотском море увеличивается на 3 сут. Наблюдается коэффициент корреляции 0,78 между длительностью безледного периода в ноябре и суммарной продолжительностью штормов с высотами волн более 2 м.

### Закключение

В среднем в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море штормов с высотами волн более 2 м наблюдается ~23 в год, а штормов с высотами волн более 3 м — ~9, в то время как в Чукотском море — 39 и 23 шторма соответственно. При оценке сезонной изменчивости наибольшее количество штормов наблюдается в летне-осенний период с максимальными средними количествами штормов с высотами волн более 2 м летом в Чукотском море (18), а с высотами волн более 3 м — осенью (15).

Подробный анализ сезонной изменчивости повторяемости и продолжительности штормов показал устойчивый рост штормовой активности в морях Восточной Арктики. Найдены положительные и значимые тренды для количества штормов с высотами волн более 2 м в летний и осенний периоды для всех морей Восточной Арктики. Наибольшая величина положительного значимого тренда для количества штормов составляет 2 шторма/10 лет

и наблюдается в летний и осенний периоды в Восточно-Сибирском море. Наибольший рост суммарной продолжительности штормов наблюдается осенью в море Лаптевых (6 сут/10 лет) и в Чукотском море (5,6 сут/10 лет).

Также положительные тренды присутствуют в продолжительности безледного периода (величины трендов — 8 сут в Чукотском море и порядка 10 сут в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море за 10 лет). Растет количество циклонов в море Лаптевых (3 циклона/10 лет) и в Восточно-Сибирском море (1 циклон/10 лет).

Количество штормов и их продолжительность хорошо коррелируют с увеличением продолжительности безледного периода для всех морей. Коэффициент корреляции превышает 0,7 с максимальным значением 0,84 в море Лаптевых. На количество штормов осенью в море Лаптевых и летом в Восточно-Сибирском море также существенно влияет увеличение количества циклонов, проходящих над акваторией морей (корреляция 0,55—0,61). В Чукотском море коэффициент корреляции между количеством циклонов и количеством штормов составляет 0,55. Тренд для количества циклонов положительный, но незначимый.

Выявленные связи количества циклонов и количества штормов не являются сильными, что может указывать на следующие дискуссионные вопросы: возможно, часть штормов с высотой волн более 2 м образуется при антициклоне?, возможно, учет циклонов, центр которых проходит через акваторию моря без учета радиуса и периферии, не совсем корректен?, возможно, даже при сильном ветре с берега короткий разгон ограничивает рост волн, что указывает на необходимость учета направления ветра?, также есть вероятность прихода волн под воздействием циклонов из-за официальных границ исследуемых акваторий, принятых в данной работе (так, для Чукотского моря очевидно наличие с севера и северо-востока достаточных пространств открытой воды). Все эти вопросы достаточно сложны, и по сути требуется подробный разбор каждого шторма и анализ всех сопутствующих факторов и условий, но в будущем мы планируем это сделать.

Тем не менее во всех морях наблюдаются положительные тренды для количества циклонов в безледный период, что ставит под сомнение гипотезу о росте волн исключительно за счет больших разгонов при отступании кромки льдов. Возможно, рост волн больше связан со смещением безледного периода на осень и со статистически большей вероятностью возникновения циклонов в осенний период.

Полученные выводы о климатических изменениях в штормовой активности важны для оценки перспектив развития Северного морского пути. Меняющиеся природные условия должны учитываться при планировании добычи и транспортировки природных ресурсов в морях российской Арктики.

С практической точки зрения полученные результаты дополняют имеющиеся данные о режиме ветрового волнения в исследуемых морях.

### Финансирование

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00239). Работа Е. Е. Кругловой выполнена в рамках темы № FMWE-2024-0016 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

### Литература/References

1. Объем перевозок по Северному морскому пути достиг 36 млн тонн грузов в 2023 году. — URL: <https://www.interfax.ru/russia/939623>.  
The volume of cargo transportation along the Northern Sea Route reached 36 million tons in 2023. Available at: <https://www.interfax.ru/russia/939623>. (In Russian).
2. Ерохин В. Л. Динамика грузоперевозок по Северному морскому пути (2013—2023 гг.) // Маркетинг и логистика. — 2023. — Т. 6. — С. 50.  
Erokhin V. L. Dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route (2013—2023). *Marketing i logistika* [Marketing and Logistics], 2023, vol. 6, p. 50. (In Russian).
3. Атаки хуситов привели к падению объема перевозок через Суэцкий канал на две трети. — URL: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/831270-ataki-khusitov-priveli-k-padeniyu-obema-perevozok-cherez-suetskiy-kanal-na-dve-treti/>.  
Houthi attacks led to a two-thirds drop in the volume of transportation through the Suez Canal. Available at: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/831270-ataki-khusitov-priveli-k-padeniyu-obema-perevozok-cherez-suetskiy-kanal-na-dve-treti/>. (In Russian).
4. Zhang Y., Sun X., Zha Y., Wang K., Chen C. Changing Arctic Northern Sea Route and Transpolar Sea Route: A Prediction of Route Changes and Navigation Potential before Mid-21st Century. *J. of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 12, p. 2340. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse11122340>.
5. Li T., Zhang Y., Liu H., Chen C. Feasibility of the Northern Sea Route: Impact of Sea Ice Thickness Uncertainty on Navigation. *J. of Marine Science and Engineering*, 2024, vol. 12, no. 7, p. 1078. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse12071078>.
6. 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.  
Gurlev I. V., Makosko A. A., Malygin I. G. Analysis of the state and development of the transport system of the Northern Sea Route. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, vol. 12, no. 2 (46), pp. 258—270. DOI: 10.25283/22234594-2022-2-258-270. (In Russian).
7. 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.  
Zelenkov M. Yu. Transport and logistics system of the Northern Sea Route: Prospects, problems, and ways to solve them. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 4 (36), pp. 131—140. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-131-140. (In Russian).
8. Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, no. 409. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos14020409>.
9. Алексеев Г. В., Харланенкова Н. Е. Связь между сокращением морских льдов и ростом температуры воздуха в Арктике // Лед и Снег. — 2024. — Т. 64, № 1. — С. 96—105.  
Aleksseev G. V., Kharlanenkova N. E. The relationship between sea ice reduction and air temperature increase in the Arctic. *Ice and Snow*, 2024, vol. 64, no. 1, pp. 96—105. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2076673424010077>. (In Russian).
10. Подпорин С. А., Холопцев А. В. Тенденции изменения средней толщины ледяного покрова, уровня и поверхностной солености вод моря Лаптевых в зимне-весенний период при дальнейшем потеплении климата // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15, № 6. — С. 923—931.  
Podporin S. A., Kholoptsev A. V. Trends in changes in average ice cover thickness, sea level, and surface salinity in the Laptev Sea during the winter-spring period under continued climate warming. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2023, vol. 15, no. 6, pp. 923—931. Available at: <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-6-923-931>. (In Russian).
11. Заболотских Е. В. и др. Спутниковое микроволновое зондирование морского льда Арктики: Обзор // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2023. — Т. 20, № 1. — С. 9.  
Zabolotskikh E. V. et al. Satellite microwave sensing of Arctic sea ice. Overview. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space], 2023, vol. 20, no. 1, p. 9. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34. (In Russian).
12. Тимофеева А. Б., Юлин А. В., Иванов В. В. и др. Ледовитость российских арктических морей трассы Северного морского пути в современный климатический период // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 1. — С. 135—146.  
Timofeeva A. B., Yulin A. V., Ivanov V. V. et al. Ice conditions of the Russian Arctic seas along the Northern Sea Route in the current climatic period. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 135—146. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-135-146. (In Russian).
13. Stopa J. E., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F. Wave climate in the Arctic 1992—2014: Seasonality and trends. *The*

- Cryosphere, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 1605—1629. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-10-1605-2016>.
14. *Christakos K., Guo H., Mongeon C., Moghaddam S., Abed-Navandi D., Shi H.* Long-term assessment of wave conditions and wave energy resource in the Arctic Ocean. *Renewable Energy*, 2024, vol. 220, p. 119678. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119678>.
15. *Overeem I., Anderson R. S., Wobus C. W., Clow G. D., Urban F. E., Matell N.* Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38, no. 17. DOI: 10.1029/2011GL048681.
16. *Casas-Prat M., Wang X. L., Swart N.* CMIP5-based global wave climate projections including the entire Arctic Ocean. *Ocean Modelling*, 2018, vol. 123, pp. 66—85. DOI: 10.1016/j.ocemod.2017.12.003.
17. *Freitas A., Bernardino M., Soares C. G.* The influence of the Arctic Oscillation on North Atlantic wind and wave climate by the end of the 21st century. *Ocean Engineering*, 2022, vol. 246, p. 110634. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110634.
18. *Khon V. C., Mokhov I. I., Chernokulsky A. V., Semenov V. A., Ogi M.* Wave heights in the 21st century Arctic Ocean simulated with a regional climate model. *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, no. 8, pp. 2956—2961. DOI: 10.1002/2014GL059847.
19. *Casas-Prat M., Wang X. L.* Projections of extreme ocean waves in the Arctic and potential implications for coastal inundation and erosion. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 2020, vol. 125, no. 8, p. e2019JC015745. DOI: 10.1029/2019JC015745.
20. *Голубкин П. А., Кудрявцев В. Н., Шапрон Б.* Поле ветрового волнения в Арктике по данным спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С 25.
- Golubkin P. A., Kudryavtsev V. N., Chapron B.* Wind wave field in the Arctic according to satellite altimetry data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Remote Sensing of Earth from Space]*, 2015, no. 4, p. 25. DOI: 10.7868/S0205961415030045. (In Russian).
21. *Нестеров Е. С.* Ветровое волнение в арктических морях (обзор) // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. — 2020. — № 3. — С. 19—41.
- Nesterov E. S.* Wind waves in the Arctic seas (review). *Hydrometeorological research and forecasts*. — 2020, no. 3, pp. 19—41. Available at: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-19-41>. (In Russian).
22. *Мысленков С. А., Круглова Е. Е., Багатинский В. А.* Повторяемость штормового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. — 2024. — С. 41—55.
- Myslenkov S. A., Kruglova E. E., Bagatinsky V. A.* Frequency of storm waves in the Laptev, East Siberian, and Chukchi Seas. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2024, pp. 41—55. Available at: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-41-55>. (In Russian).
23. *Myslenkov S., Kruglova E., Medvedeva A., Silvestrova K., Arkhipkin V., Akpinar A., Dobrolyubov S.* Number of Storms in Several Russian Seas: Trends and Connection to Large-Scale Atmospheric Indices. *Russ. J. Earth Sci.*, 2023, vol. 23, p. ES3002. Available at: <https://doi.org/10.2205/2023es000828>.
24. *Мысленков С. А.* Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. — 2023. — № 1. — С. 87—101.
- Myslenkov S. A.* Modeling of wind waves in the Laptev, East Siberian, and Chukchi Seas. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2023, no. 1, pp. 87—101. Available at: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-87-101>. (In Russian).
25. *Мысленков С. А.* Анализ высоты ветровых волн и продолжительности безледного периода вдоль Северного морского пути с 1979 по 2021 гг. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2024. — № 2. — С. 134—145.
- Myslenkov S. A.* Analysis of wind wave heights and ice-free period duration along the Northern Sea Route from 1979 to 2021. *Moscow University Bull. Ser. 5. Geography*, 2024, no. 2, pp. 134—145. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.11. (In Russian).
26. *Лопатухин Л. И.* Ветровое волнение: учебное пособие. — СПб., 2012.
- Lopatukhin L. I.* *Wind Waves: A Textbook*. Saint Petersburg, 2012. (In Russian).
27. *Круглова Е. Е., Мысленков С. А., Платонов В. С.* Пространственная изменчивость трендов значительных высот волн в Карском море // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2024. — Т. 70, № 1. — С. 6—20.
- Kruglova E. E., Myslenkov S. A., Platonov V. S.* Spatial variability of trends in significant wave heights in the Kara Sea. *Arctic and Antarctic Research*, 2024, vol. 70, no. 1, pp. 6—20. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-6-20>. (In Russian).
28. *Kruglova E., Myslenkov S.* Influence of Long-Term Wind Variability on the Storm Activity in the Caspian Sea. *Water*, 2023, vol. 15, no. 11, p. 2125. Available at: <https://doi.org/10.3390/w15112125>.
29. International Hydrographic Organization. Available at: <https://iho.int/>.
30. *Cassano E., Valkonen E., Cassano J.* Northern Hemisphere cyclone track data — Arctic Ocean focus 1979—2018, 2071—2100. *Arctic Data Center*, 2022.
31. *Waseda T., Cavaleri L., Stopa J., Goldstein E., Thomson J., Arduin F., Kohout A., Doble M., Hwang P., Fox-Kemper B.* Correlated Increase of High Ocean Waves and Winds in the Ice-Free Waters of the Arctic Ocean. *Scientific Reports*, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-22500-9.
32. Правила разработки и проведения морских операций НД № 2-090601-010 / Рос. мор. регистр судоходства. — СПб., 2022, 142 с.
- Pravila razrabotki i provedeniya morskikh operatsii [Rules for the development and conduct of maritime operations] ND no. 2-090601-010. Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva [Russian Maritime Register of Shipping]*. Saint Petersburg, 2022, 142 p. (In Russian).

### Информация об авторах

**Круглова Елизавета Евгеньевна**, инженер, лаборатория экспериментальной физики океана, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117218, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36); техник, кафедра океанологии, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: lissavetaandin@gmail.com.

**Мысленков Станислав Александрович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, кафедра океанологии, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1); старший научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3, стр. 1).

---

## INCREASED STORM ACTIVITY IN THE EASTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

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

<sup>1</sup> P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

<sup>3</sup> Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on September 26, 2024

### For citing

Kruglova E. E., Myslenkov S. A. Increased storm activity in the eastern sector of the Russian Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 522—535. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-522-535. (In Russian).

### Abstract

Currently, the Russian Arctic is actively engaged in economic activity related to exploration, extraction and transportation of minerals, fishing, and shipping. Data on wind wave parameters were obtained based on the WAVEWATCH III spectral model, and on wind and sea ice concentration from the NCEP/CFSR/CFSv2 reanalysis for the period from 1979 to 2021. Data on cyclones were used from a database created on the basis of NCEP reanalysis and includes information on the trajectory of cyclones and their main characteristics from 1979 to 2015. Estimates of the interannual and seasonal variability in the number and duration of storms in the Laptev Sea, East Siberian and Chukchi Seas were obtained. The obtained trend estimates indicate an increase in the number and duration of storms in all the studied seas. A relationship was found between an increase in the number of storms and a decrease in the area of sea ice, as well as an increase in the number of cyclones.

**Keywords:** *wind waves, modeling, Arctic seas, storms, cyclone recurrence.*

### Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation grant (project no. 23-27-00239). E. E. Kruglova carried out her study within the framework of topic no. FMWE-2024-0016 of the Shirshov State Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences.

---

### Information about the authors

**Kruglova, Elizaveta Evgenievna**, Engineer, Laboratory of Experimental Ocean Physics, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, Russia, 117218); Technician, Department of Oceanology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninsky Gory, Moscow, 119991), e-mail: lissavetaandin@gmail.com.

**Myslenkov, Stanislav Aleksandrovich**, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Department of Oceanology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninsky Gory, Moscow, Russia, 119991); Senior Researcher, Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences (3, p. 1, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017).

© Kruglova E. E., Myslenkov S. A., 2024