

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

М. М. Чумаков¹, П. С. Шушпанников¹, В. В. Фомин^{2,3,4}, И. И. Панасенкова^{2,3},
М. Ф. Нуриев⁵, Н. А. Дианский^{2,4,6}

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет (Москва, Российская Федерация)

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации (Москва, Российская Федерация)

⁴ Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН (Москва, Российская Федерация)

⁵ ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

⁶ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 19 марта 2025 г.

Для цитирования

Чумаков М. М., Шушпанников П. С., Фомин В. В. и др. Исследование пространственно-временной изменчивости ветрового волнения в центральной части Баренцева моря при развитии экстремальных синоптических ситуаций по результатам ретроспективного моделирования // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 1. — С. 28—39. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-28-39.

Проведен анализ экстремальных волновых характеристик в центральной части Баренцева моря на основе результатов ретроспективного моделирования за период с 1981 по 2022 гг. по модели SWAN. Показано, что распределение значений продолжительности штормовых ситуаций является двумодальным: с продолжительностью 55–67 ч (I группа) и 166–169 ч (II группа). Отмечено, что развитие штормового волнения на рассматриваемой акватории может служить предвестником прихода циклона, так как оно начинается на несколько часов раньше, чем скорость ветра достигает штормового значения. Результаты исследования характеристик волнения важны для организации безопасности судоходства и планирования морских операций.

Ключевые слова: Баренцево море, ретроспективное моделирование, интенсивные циклоны, штормовое волнение, критерий Манна – Кендалла, оценочная функция Тейла – Сена.

Введение

Ветро-волновой режим является одним из определяющих факторов ведения эффективной хозяйственной деятельности, организации рыбного промысла и безопасного судоходства [1]. Значительную часть года над акваторией Баренцева моря (БМ) преобладают штормовые погодные условия [2]. В зимние месяцы периоды, в течение которых скорость ветра не превышает 15 м/с, в среднем со-

ставляют 3–6 дней [3]. Сильные штормы приводят к интенсификации ветрового волнения, что в совокупности затрудняет или полностью останавливает проведение морских операций, работу портов и эксплуатацию морских нефтегазовых сооружений и тем самым приводит к материальному ущербу. Штормовое волнение (когда высота волн составляет 4 м и более) приводит к разрушению как берегов, так и сооружений на них.

Зоны штормового волнения в БМ в большинстве случаев образуются при выходе на акваторию моря глубоких циклонов, в том числе и полярных [4], с се-

© Чумаков М. М., Шушпанников П. С., Фомин В. В.,
Панасенкова И. И., Нуриев М. Ф., Дианский Н. А., 2026

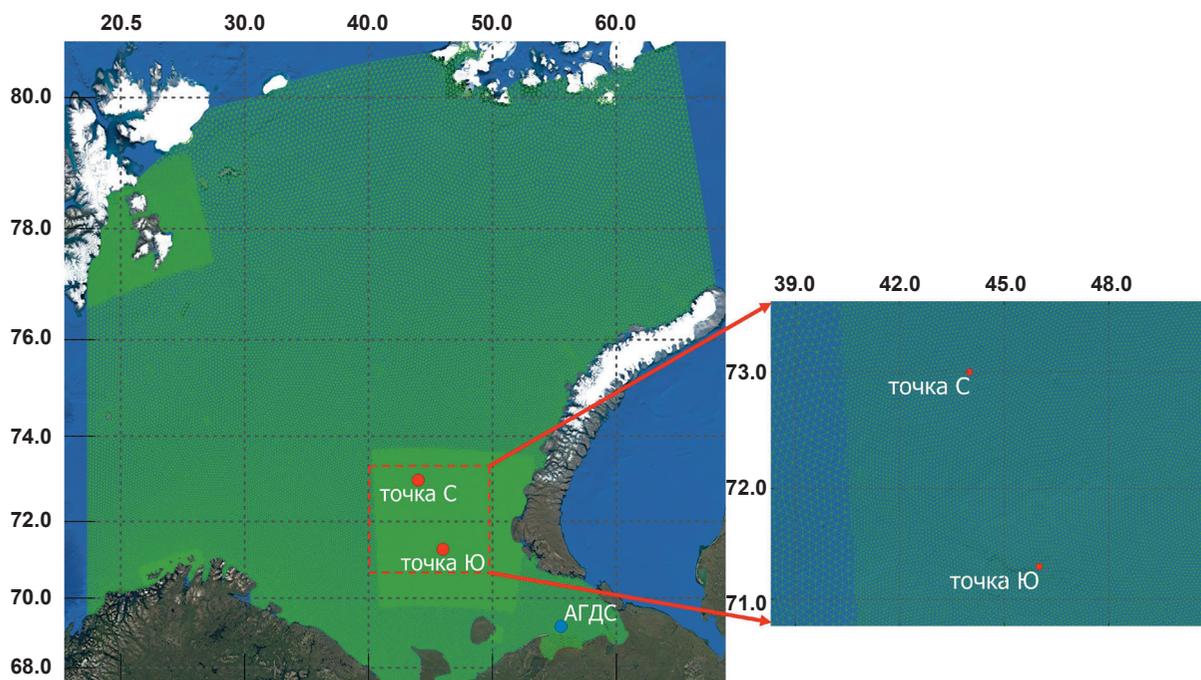


Рис. 1. Модельная нерегулярная сетка для акватории БМ
Fig. 1. Unstructured grid for the Barents Sea water area

верной Атлантики, Норвежского моря или Скандинавского полуострова [5]. В БМ в отличие от других морей Северного Ледовитого океана в течение всего года сохраняются большие свободные ото льда пространства, что в сочетании с активной циклонической деятельностью приводит к высокой повторяемости штормового волнения. На распространение ветровых волн и волн зыби значительным образом влияют не только ветровой [6], но и ледовый [7] режимы, изрезанность береговой черты, наличие островов, а также колебания уровня моря и сильные суммарные течения, которые могут увеличивать высоту волны при распространении волн навстречу потоку, изменять направление распространения и период волн [8].

Сведения о режиме ветрового волнения БМ представлены в [2; 9—11]. Однако до сих пор остается недостаточно изученным влияние экстремальных ветровых штормовых ситуаций на формирование полей волнения. С практической точки зрения главный интерес представляют штормы, при которых развивается наиболее опасное волнение. Согласно РД 52.88.699-2008 [12], к опасным относятся волны, высота которых в прибрежных районах составляет не менее 4 м, а в открытом море — не менее 6 м. Согласно [10], практически на всей акватории БМ может наблюдаться волнение с высотой более 6 м. В справочных данных Российского морского регистра судоходства [13] отмечается, что высота волн 50%-ной обеспеченности с повторяемостью 1 раз в год составляет 6,1 м, а для 0,1%-ной обеспеченности превышает 19 м. В [2] также отмечается, что

в центральной части БМ максимальная высота значительных волн, полученная за период моделирования с 1979 по 2010 гг., достигала 12—14 м. Анализ повторяемости случаев штормового волнения различной высоты в БМ показал, что случаи с высотой волн более 4 м наблюдаются в среднем 70—80 раз в год, более 5 м — 40—60 раз в год. Прохождение полярных циклонов приводит к быстрому увеличению значительной высоты волны до 10—12 м [14] и 15 м [15]. В [16] отмечается рост значительной высоты волны от 1,78 до 9,0 м за 14 ч.

В данной работе исследованы характеристики ветрового волнения, вызванного прохождением отдельных экстремальных штормов в БМ за период с 1981 по 2022 гг. по результатам ретроспективного моделирования с использованием спектральной волновой модели SWAN (Simulating Waves Nearshore) [17], адаптированной для расчетов на акватории БМ с учетом наличия ледяного покрова.

Материалы и методы

Расчеты по модели SWAN выполнялись на нерегулярной сеточной области, представленной на рис. 1, с шагом по пространству 1 км в районах потенциального размещения объектов обустройства газоконденсатных месторождений в центральной и юго-восточной частях БМ, а в остальной акватории моря — с шагом 3,5 км. Разрешение расчетной сетки было выбрано исходя из предъявленных требований к проведению инженерных изысканий в данных районах. Для ее построения использовалась программа VatTri [18]. Цифровая модель ре-

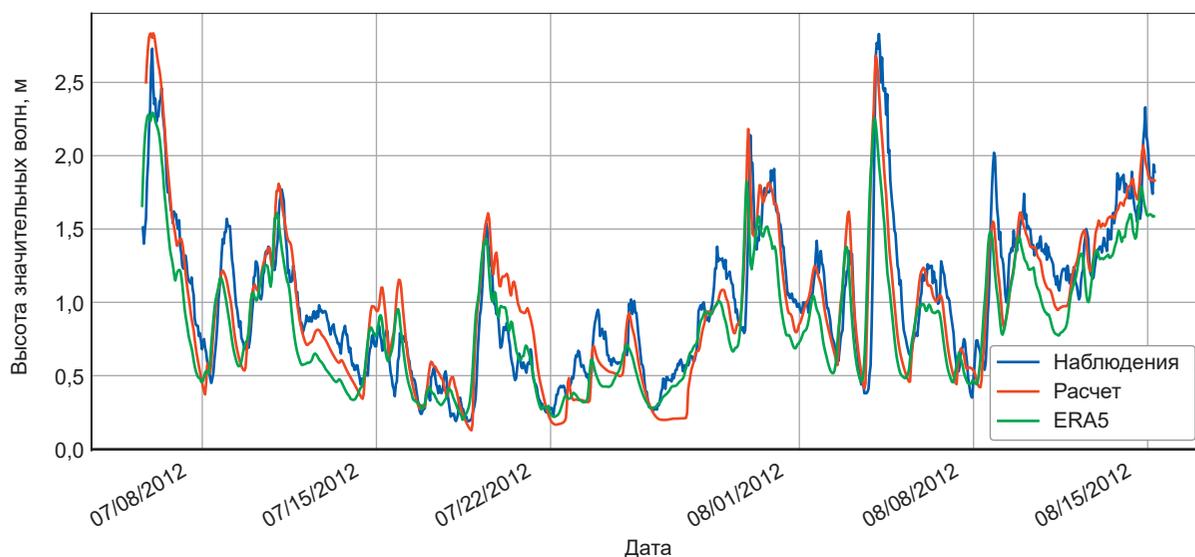


Рис. 2. Высоты значительных волн (м) по измерениям (синий ряд) на АГДС, результатам расчетов (красный ряд) и по данным ERA-5 (зеленый ряд) за период с 5 июля по 15 августа 2012 г.

Fig. 2. Heights of significant waves (m) according to measurements (blue line) at the AHBS (autonomous hydrological bottom station), simulation's results (red line) and ERA-5 (green line) for the period from July 5 to August 15, 2012

льефа дна БМ построена на основе массива GEBCO [19], пространственное разрешение которого составляет 400 м, а также доступных данных с навигационных карт.

В качестве граничных условий на открытых границах использовались данные спектров волнения из реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП, ECMWF) ERA-5. Начальные значения полей параметров волнения получены методом расчета на установление стационарного состояния.

В качестве атмосферного форсинга использовались поля скорости ветра на высоте 10 м с пространственным разрешением 0,25×0,25° по долготе и широте соответственно из ERA-5. При проведении расчетов также использовались поля скоростей течений, уровня моря и сплоченности льда, рассчитанные по российской модели морской циркуляции INMOM [20—22]. Учет колебаний уровня моря и скоростей течений чрезвычайно необходим, так как ввиду интенсивных приливных колебаний они могут приводить к значительной интенсификации волнения [1]. Возможность расчета волновых характеристик в ледовых условиях также крайне важна [7].

В расчетах использованы следующие настройки модели SWAN: схема ST6 в конфигурации UP, HWANG, VECTAU, U10PROXY, DEBIAS, AGROW и в сочетании со схемой SSWELL ZIEGER. Для параметризации процесса диссипации энергии вследствие обрушения гребней использовалась схема WCAP KOMEN, а остальные настройки модели оставались стандартными. Спектральное разрешение модели составило 36 направлений (с шагом 10°), частотный диапазон — 40 интервалов от 0,03 до 0,5 Гц. Шаг по времени составил 15 мин.

Верификация модели волнения

Для верификации модели ветрового волнения использовались доступные данные с автономной гидрологической донной станции (АГДС) (см. рис. 1) за период с 5 июля по 15 августа 2012 г. На рис. 2 приведено сравнение высот волн с АГДС с результатами расчета по модели SWAN и по данным ERA-5, которые билинейно интерполировались в точку местоположения АГДС.

Результаты сравнения показали, что модель успешно воспроизводит временную изменчивость высот волн. Коэффициент корреляции R_c составляет 0,9, а среднеквадратичная ошибка (RMSE) — 0,24 м. Кроме того, не происходит существенного занижения экстремальных значений рассматриваемого временного ряда наблюдений. Также были определены медианные значения средней (BIAS) и средней абсолютной (MAE) ошибок расчетов, которые составили 0,05 и 0,15 м соответственно, что сравнимо с точностью определения высоты значительных волн по данным приборных измерений. В случае ERA-5 R_c составляет 0,87, RMSE — 0,28 м, а медианные значения BIAS и MAE — 0,15 и 0,19 м.

Для анализа качества воспроизведения экстремального волнения в районе исследования (40,0—49,7° в. д. и 70,8—73,36° с. ш.) выполнено сравнение результатов расчета по модели SWAN и данным ERA-5 со спутниковыми данными Sentinel-3B, Saral-Altika и Cryosat2 для штормовых условий 2022 г., в которых наблюдаемые высоты волн были выше 5,5 м, а длины выборок составили 188, 208 и 189 значений соответственно. Диаграммы рассеяния для Sentinel-3B представлены на рис. 3, а оценки точности — в табл. 1. На рис. 3 по оси абсцисс отложены высоты волн по спутнико-

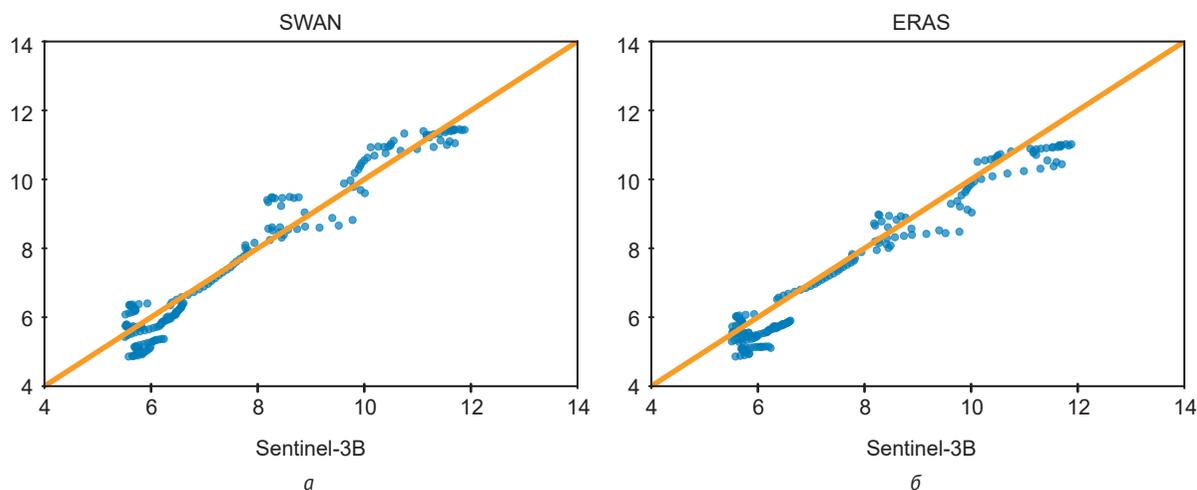


Рис. 3. Диаграммы рассеяния для сравнения результатов расчета по модели SWAN (а) и реанализа ERA-5 (б) с данными Sentinel-3B. По оси абсцисс отложены высоты волн по спутниковым данным, а по оси ординат – результаты расчета и ERA-5
Fig. 3. Scatter plots comparing the SWAN simulation results (а) and ERA-5 (б) with Sentinel-3B. The wave heights based on satellite data are plotted along the abscissa axis, and the calculation results and ERA-5 are plotted along the ordinate axis

Таблица 1. Статистические характеристики: MAE (м), BIAS (м) и RMSE (м) результатов расчета и ERA-5 относительно спутниковых данных

Table 1. Statistical characteristics: MAE (m), BIAS (m), RMSE (m) of the SWAN simulation results and ERA-5 relative to satellite data

Модель	Спутник	MAE	BIAS	RMSE
SWAN	Sentinel-3B	0,41	-0,07	0,51
	Saral-Altika	0,41	0,14	0,54
	Cryosat2	0,43	0,27	0,6
	Среднее	0,42	0,11	0,55
ERA-5	Sentinel-3B	0,45	-0,34	0,54
	Saral-Altika	0,36	-0,3	0,43
	Cryosat2	0,46	-0,2	0,57
	Среднее	0,42	-0,28	0,51

вым данным, а по оси ординат — результаты расчета (а) и ERA-5 (б).

Сравнительный анализ показал, что результаты расчета в части определения средних значений ближе к спутниковым данным (BIAS составляет 0,11 м). В ERA-5 наблюдается занижение экстремальных высот волн: BIAS составляет -0,28 м. Средние значения MAE одинаковы, а RMSE в среднем на 0,04 м ниже в ERA-5. В целом результаты расчета и данные ERA-5 не занижают экстремальные значения высот волн: данные ERA-5 в среднем на 2—3% ниже, чем спутниковые измерения, а результаты расчета выше на 1—2%.

Таким образом, реанализ волновых характеристик, полученный по модели SWAN, находится на одном уровне с наиболее современными волновыми

реанализами, при этом, имея более высокое разрешение в отдельных областях и в частности в прибрежной зоне, он имеет несомненное преимущество для анализа волнового режима.

Пространственно-временная изменчивость ветрового волнения при развитии экстремальных синоптических ситуаций

Для анализа пространственно-временной структуры параметров ветрового волнения выполнен автоматизированный поиск экстремумов скоростей ветра по массиву данных ERA-5 за период с 1981 по 2022 гг. для двух районов центральной части акватории БМ с центрами в точке С (73° с. ш., 44° в. д.) в ее северной части и в точке Ю (71,3° с. ш., 46° в. д.) в южной части в районе Гусиной банки, представленными на рис. 1. Выбор этих районов обусловлен их важностью в связи с возможным освоением нефтегазовых месторождений, расположенных в акватории моря.

В табл. 2 приведены основные характеристики идентифицированных экстремальных синоптических ситуаций (ЭСС) в точках С и Ю, а также параметры ветрового волнения, которые наблюдались в период этих ЭСС.

Некоторые из рассматриваемых ЭСС определялись прохождением интенсивных полярных циклонов. Так, представленные в табл. 1 штормы 1984 г. (№ 8 для точки Ю), 1997 г. (№ 2 для точки С и № 5 для точки Ю), 2011 г. (№ 7 для точки С), 2018 г. (№ 6 для точки Ю) также есть в базе данных о полярных циклонах [23]. Средняя продолжительность идентифицированных штормов в районах точек С и Ю составила около 40 и 30 ч соответственно.

Данные табл. 2 показывают, что распределение значений продолжительности штормового волнения (т. е. случаев, когда высота значительных волн превышала 2,5 м) является двумодальным, т. е. опре-

Таблица 2. Основные характеристики ЭСС в точках С и Ю (Dstart — дата начала, T — продолжительность, Wmax — максимальная скорость ветра, Hmax — максимальное значение высоты значительных волн)
 Table 2. Characteristics of extreme synoptic situations (ESS) at the points N and S (Dstart — start date, T — duration, Wmax — maximum wind speed, Hmax — maximum value of significant wave height)

Ветровой режим					Волновой режим			
№	Dstart	T, ч	Wmax, м/с	Румб	Dstart	T, ч	Hmax, м	Румб
Точка С					Точка С			
1	20.02.2013 19:00	43	24,02	С	20.02.2013 20:00	52	9,19	С
2	09.01.1997 17:00	49	22,25	СЗ	09.01.1997 14:00	75	6,60	С
3	18.12.2002 15:00	38	21,90	СЗ	16.12.2002 19:00	140	7,43	СЗ
4	16.12.2001 16:00	46	21,89	С	13.12.2001 5:00	161	9,09	С
5	15.12.1990 9:00	35	21,51	З	13.12.1990 18:00	136	8,95	С
6	08.11.2004 0:00	37	21,34	СЗ	06.11.2004 7:00	94	10,14	СЗ
7	14.11.2011 1:00	50	21,32	С	10.11.2011 22:00	228	9,04	С
8	25.01.2007 3:00	22	21,32	Ю	25.01.2007 3:00	48	8,82	ЮЗ
Точка Ю					Точка Ю			
1	20.02.2013 20:00	44	25,78	СЗ	20.02.2013 5:00	67	8,86	СЗ
2	16.12.2001 22:00	47	25,54	С	13.12.2001 5:00	160	9,52	С
3	17.03.2003 13:00	8	23,27	СВ	16.03.2003 4:00	46	6,21	С
4	23.07.2010 15:00	23	23,09	З	23.07.2010 14:00	34	10,58	З
5	10.01.1997 14:00	30	22,71	СЗ	09.01.1997 2:00	88	8,01	СЗ
6	30.12.2018 7:00	17	22,30	С	29.12.2018 18:00	44	8,60	С
7	21.03.2022 19:00	37	22,15	СЗ	21.03.2022 17:00	55	10,76	З
8	14.02.1984 14:00	34	22,14	СЗ	11.02.1984 18:00	179	8,40	З

деляется двумя группами характерных штормов. В области расположения точки С I группа случаев штормового волнения имеет среднюю продолжительность 67 ч, II группа — 166 ч, а в области распо-

ложения точки Ю — 55 и 169 ч соответственно.

Анализ результатов показывает, что штормовое волнение I группы индуцируется преимущественно одиночными интенсивными циклонами, диаметр которых чаще всего не превышает 350 км. Характерные циклоны I группы на стадии зарождения и развития перемещаются от архипелага Шпицберген в сторону архипелага Новая Земля (например, циклон января 1997 г.). Далее они движутся в южном направлении вдоль береговой линии архипелага Новая Земля, при этом их скорость перемещения существенно снижается. Кроме того, наблюдаются циклоны, которые приходят как со стороны Норвежского моря (в 2013 и 2022 гг.), так и со стороны Скандинавского полуострова (в 2010 г.). Давление в центрах этих циклонов составляет 970—980 гПа. Возможны ситуации, относящиеся к I группе, когда в акватории БМ и прилегающих к нему акваториях наблюдаются пара циклонов, но в таком случае только влияние одного из них (как правило, наиболее глубокого и проходящего ближе к центральной части БМ) приводит к формированию штормового волнения. Влияние второго незначительно, поэтому продолжительность штормовой ситуации в среднем составляет 55—67 ч.

На рис. 4 приведена характерная структура поля скорости ветра, формирующаяся при перемещении циклонов I группы в субмеридиональном направлении. Из приведенных данных следует, что наибольшие скорости ветра формируются в правом секторе циклонов, что определяет развитие штормового волнения в центральной части БМ.

Для I группы штормовых ситуаций средний промежуток времени, в течение которого высоты волн достигали максимальных значений, составляет 26 ч. В среднем высота значительных волн увеличивалась на 6,2 м за 26 ч, а максимальное увеличение составило 8 м за 10 ч в районе рас-

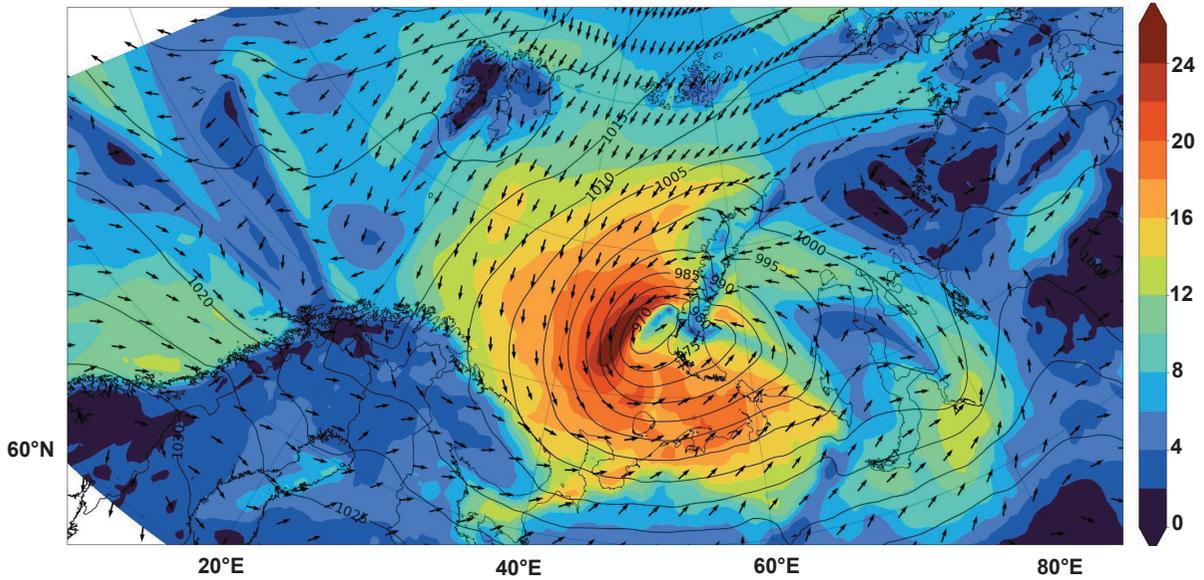


Рис. 4. Характерная структура поля скорости ветра, формирующаяся при перемещении циклонов I группы в субмеридиональном направлении, 05:00 UTC 21.02.2013 г.

Fig. 4. Specific structure of the wind field formed when cyclones of the first group move in the submeridional direction, 05:00 UTC February 21, 2013

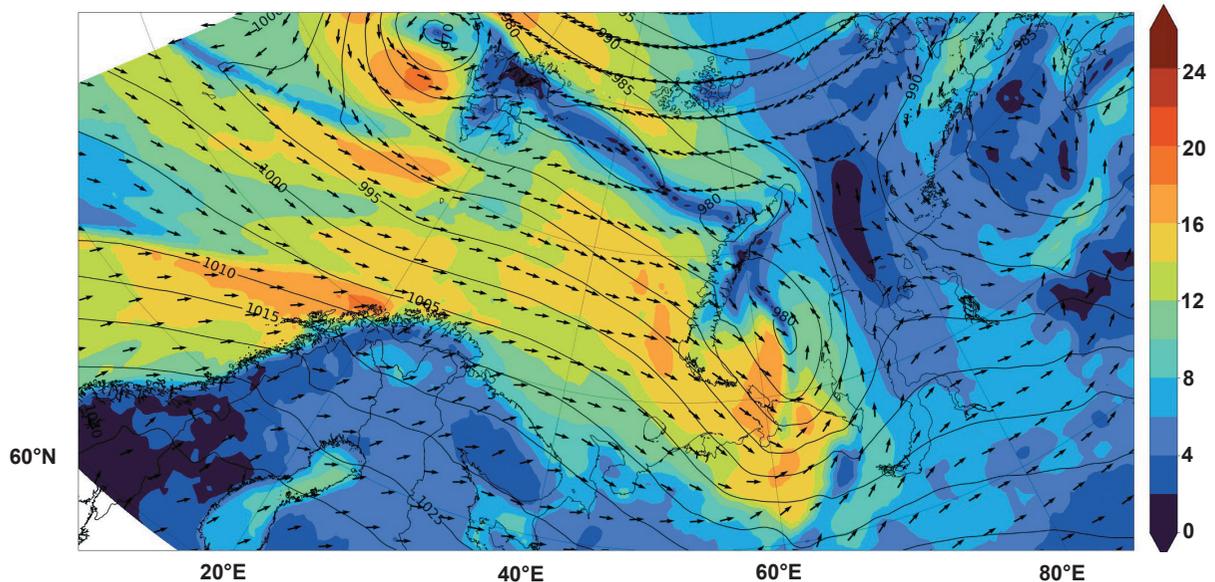


Рис. 5. Характерная структура поля скорости ветра, формирующаяся при штормовых ситуациях II группы, 00:00 UTC 18.12.1990

Fig. 5. Specific structure of the wind field formed during the second group storms, 00:00 UTC December 18, 1990

положения точки Ю и 6,7 м за 9 ч в районе расположения точки С.

Анализ данных атмосферного реанализа позволил сделать вывод, что штормовое волнение II группы индуцируется под воздействием системы одновременно существующих интенсивных циклонов, имеющих различные размеры (рис. 5), которые следуют один за другим, объединяясь в серии (кластеры), и перемещаются по направлению к архипелагу Новая Земля. Давление в центрах этих циклонов

может понижаться до 965—970 гПа. Штормовое волнение в данном случае формируется под их последовательным воздействием, приводя к увеличению периода максимальной штормовой активности в центральной части БМ и, таким образом, к формированию системы волн с высотами, превышающими 2,5 м.

Одновременное существование нескольких циклонов определяет смешанный тип волнения в центральной части БМ, когда наряду с ветровыми вол-

нами, индуцируемыми близлежащим циклоном, на акватории также присутствуют высокие волны зыби, которые распространяются из районов, на которые оказывают воздействие другие циклоны этой системы.

Такой характер распространения волн определяет большие длительности штормовых ситуаций, чем при штормовых ситуациях I группы (прохождение одиночного циклона). При этом следует отметить, что траектории перемещения циклонов и различия в их размерах обуславливают возможность высокой пространственной изменчивости: в точке С может фиксироваться шторм, тогда как в точке Ю штормовые условия наблюдаться не будут.

Значения средней продолжительности для I и II случаев в точках С и Ю отличаются незначительно. Это связано в первую очередь с большими масштабами атмосферных процессов, при которых на всей акватории центральной части БМ экстремальное волнение формируется при прохождении либо одиночных циклонов (I группа), либо под воздействием системы одновременно существующих интенсивных циклонов (II группа).

Анализ данных, представленных в табл. 1, показал, что штормовое волнение начинается на рассматриваемой акватории, как правило, значительно раньше, чем скорость ветра достигнет штормового значения (15 м/с). Разница в сроках может составлять от нескольких часов до нескольких суток. Это связано с тем, что скорость распространения ветровых волн значительно превышает скорость перемещения циклона и, следовательно, развитие штормового волнения на рассматриваемой акватории при относительно низкой скорости ветра является предвестником прихода циклона.

При этом в штормах, индуцированных одиночными циклонами (I группа), волны достигают максимальных значений в среднем через 1,5 ч после того, как скорость ветра в данном шторме достигнет максимума, а при штормовых ситуациях II группы — через 6 ч.

Характеристика случаев экстремального волнения

Выделение штормовых ситуаций сильного волнения (при котором высоты значительных волн превышали 2,5 м) показало, что в точке С за последние 40 лет в соответствии с критериями РД 52.88.699-2008 наблюдалось 728 случаев опасного волнения (с высотами волн более 6 м), из которых 254 относятся к случаям стихийного волнения (с высотами волн более 8 м). Таким образом, получено, что на рассматриваемой акватории в среднем за год наблюдается 12 случаев опасного и 6 случаев стихийного волнения.

Аналогично в точке Ю за исследуемый период идентифицировано 638 случаев опасного и стихийного волнения, из которых 190 относятся к случаям стихийного волнения, т. е. в точке Ю в среднем за год наблюдается около 11 случаев опасного и 4—5 случаев стихийного волнения.

Сопоставление значений, полученных для точек С и Ю, показывает, что наблюдается меридиональная изменчивость по количеству штормовых ситуаций, возможных в центральной части БМ. В южной ее части следует ожидать на 1—2 штормовые ситуации меньше, чем в центральной и северной частях.

Для анализа наиболее опасных штормовых событий из всех идентифицированных случаев стихийного волнения выбраны те штормовые ситуации, период повторяемости которых составляет не менее 5 лет. Для расчета повторяемости штормов не использовались теоретические распределения. Наличие длительного ряда (более 40 лет) позволяет ранжировать штормовые ситуации по интенсивности и на основе ранжированного ряда оценить период повторяемости.

Параметры ветрового волнения при ЭСС для точек С и Ю приведены в табл. 3, где номер шторма соответствует его рангу в ряду, построенном по значениям максимальных высот значительных волн, наблюдаемых в идентифицированных штормах. Таким образом, шторм с максимальной за 40 лет высотой значительных волн имеет ранг, равный 1.

Таблица 3. Параметры ветрового волнения при ЭСС в точках С и Ю

Table 3. Parameters of wind waves during extreme storms at the points N and S

Показатель	Номер шторма							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Точка С								
Дата начала	2022-03-19 02:00:00	2004-11-06 07:00:00	2010-08-15 14:00:00	2013-02-20 20:00:00	2015-03-12 23:00:00	2001-12-13 05:00:00	2011-11-10 22:00:00	1990-12-13 18:00:00
Продолжительность, ч	117	94	63	52	129	161	228	136
Высота значительных волн, м	11,15	10,14	9,79	9,19	9,18	9,09	9,04	8,96

Показатель	Номер шторма							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Точка С								
Значительная высота зыби, м	9,61	8,59	8,17	7,39	7,59	7,29	7,24	7,16
Средний период, с	11,30	10,70	10,39	9,74	10,28	9,67	9,70	9,81
Период пика спектра	15,38	13,36	13,36	11,61	13,36	11,61	12,45	13,36
Румб (откуда)	348,13	320,98	320,49	276,29	346,82	251,32	263,71	355,38
Точка Ю								
Дата начала	2022-03-21 17:00:00	2010-07-23 14:00:00	2010-08-15 16:00:00	2001-12-13 05:00:00	2013-02-20 05:00:00	2011-11-13 20:00:00	1995-12-11 14:00:00	1987-12-02 07:00:00
Продолжительность, ч	55	34	68	160	67	115	96	51
Высота значительных волн, м	10,76	10,58	10,05	9,52	8,86	8,79	8,71	8,70
Значительная высота зыби, м	9,39	8,98	8,56	7,88	7,16	7,08	6,98	7,05
Средний период, с	11,50	10,79	10,80	10,17	9,83	9,84	9,90	9,87
Период пика спектра	15,38	13,36	14,33	12,45	11,61	12,45	13,36	12,45
Румб (откуда)	СЗ	З	СЗ	С	СЗ	С	СЗ	С

Сопоставление данных, представленных в табл. 3, показало, что только в ЭСС с номерами 1, 3, 4, 6 и 7, наблюдавшихся в точке С, экстремальное волнение наблюдалось также и в точке Ю. При этом шторм № 4, наблюдавшийся в точке С, в точке Ю имел 5-й ранг, шторм № 6 — 4-й ранг и шторм № 7 — 6-й ранг. Идентификация ситуаций, при которых развитие экстремального волнения на одной из рассматриваемых акваторий не сопровождалось экстремальным волнением на другой, указывает на наличие значительной пространственной изменчивости волновых характеристик в исследуемом районе БМ и возможность реализации стихийного волнения только в северном или южном районе центральной части БМ.

Климатическая изменчивость ветрового волнения

Наличие длительных временных рядов позволяет оценить как возможность наличия трендов, так и его значения. В настоящей работе наличие тренда оценивалось для следующих характеристик:

- средние за месяц значения среднесуточных значений высот значительных волн (ряд ССВ),
- максимальное за месяц из среднесуточных значений высот значительных волн (ряд МСВ),
- максимальное за месяц значение высоты значительных волн (ряд ММВВ).

Задача расчета трендов на основе гидрометеорологических данных не является простой. В ряде исследований (например, [24; 25]) отмечается, что ряды гидрометеорологических данных часто не удовлетворяют жестким условиям применения параметрических критериев проверки, в частности, предположению о нормальности, которое может неблагоприятно влиять на эффективность проверки на наличие тренда. Поэтому во многих случаях предпочтительнее использовать непараметрические критерии, так как этот тип проверки не требует дополнительных предположений о функции распределения временного ряда.

При определении климатических трендов в значениях высот значительных волн применялся непараметрический критерий Манна — Кендалла, который рекомендован к применению руководящим документом ВМО [24], а оценки линейной компоненты тренда были получены с помощью оценочной функции Тейла — Сена [26]. В расчетах предполагалось, что если вероятность ошибки при принятии гипотезы о наличии тренда составляет менее 5%, то гипотеза принимается, т. е. обеспеченность заключения о наличии тренда составляет не менее 95%.

Результаты анализа показали, что на акваториях рассматриваемых точек слабый тренд наблюдается

только в последние два десятилетия для рядов ССВ и МСВ.

Так, у ряда ССВ, построенного для точки С за 1998—2022 гг., положительный тренд наблюдался только в апреле, мае и июне. Скорость роста линейных компонент тренда составила 2—3 см/год, что соответствует увеличению средних за месяц значений среднесуточных высот значительных волн не более чем на 72 см в течение последних 24 лет. Однако на акватории точки Ю тренд наблюдался только в мае и июне, при этом максимальная скорость роста не превысила 2 см/год.

У ряда МСВ, построенного для точки С, за 1998—2022 гг. тренд наблюдался только в июле, причем скорость роста составила 4 см/год, что соответствует приращению максимальных из среднесуточных высот волн почти на 1 м. На акватории точки Ю тренд идентифицирован лишь в сентябре. Он был нисходящим с наклоном робастной прямой –8 см/год.

Выводы

В работе представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости ветрового волнения при развитии экстремальных синоптических ситуаций в центральной части БМ.

Анализ изменчивости штормового волнения (т. е. случаев, когда высота значительных волн превышала 2,5 м) показал, что распределение значений его продолжительности является двумодальным. Для I группы характерна средняя продолжительность штормового волнения 55—67 ч, а для II — 166—169 ч. Штормовое волнение I группы индуцируется одиночными интенсивными циклонами, а II группы — действием системы одновременно существующих циклонов, которые имеют различные диаметры. В штормах I группы волны достигали максимальных значений в среднем через 1,5 ч после того, как скорость ветра в данном шторме достигала максимума, а при штормовых ситуациях II группы — через 6 ч.

Количество штормовых ситуаций в течение года зависит от пространственного расположения. В северном районе центральной части БМ за последние 40 лет в среднем за год наблюдалось около 12 случаев опасного и около 6 случаев стихийного волнения, а в южном — около 11 случаев опасного и 4—5 случаев стихийного волнения. Выявлено, что в центральной части БМ возможны ситуации, когда развитие экстремального волнения в одном из его районов не сопровождается экстремальным волнением в другом.

Результаты исследования показали, что в периоды прохождения наиболее интенсивных штормовых ситуаций значение пика волнового спектра составляет 15,4 с, а среднего периода волнения — 11,5 с, что указывает на значительный вклад волн зыби в формирование экстремального волнения.

Штормовое волнение начинается, как правило, значительно раньше, чем скорость ветра достига-

ет штормового значения (15 м/с), и, следовательно, развитие штормового волнения при относительно низкой скорости ветра может являться предвестником прихода циклона. Сведения о предстоящих штормовых условиях позволят принять необходимые меры для организации и обеспечения безопасности судоходства и проведения морских операций при освоении и эксплуатации шельфовых месторождений.

Слабый положительный тренд в рядах средних и максимальных за месяц среднесуточных высот значительных волн наблюдается только в последние два десятилетия и только в период с апреля по июнь. Увеличение средних за месяц среднесуточных высот значительных волн составило не более 72 см в течение последних 24 лет, однако приращение максимальных из среднесуточных высот волн достигло почти 1 м.

Литература/References

1. Баренцево море: Экологический атлас. — М.: Фонд «НИР», 2020. — С. 447.
Barents Sea: Ecological atlas. Moscow, Fund "National Intellectual Development", 2020, 447 p. (In Russian).
2. Мысленков С. А., Маркина М. Ю., Архипкин В. С., Тилинина Н. Д. Повторяемость штормового волнения в Баренцевом море в условиях современного климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2019. — № 2. — С. 45—54.
Myslenkov S. A., Markina M. Yu., Arkhipkin V. S., Tilina N. D. Frequency of storms in the Barents Sea under modern climate conditions. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya, 2019, no. 2, pp. 45—54. (In Russian).
3. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. — СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2006. — 452 с.
Reference data on the wind and wave regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean seas. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2006, 452 p. (In Russian).
4. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. [S. l.], Cambridge Univ. Press, 2003, 612 p.
5. Нестеров Е. С. Экстремальные волны в океанах и морях. — Москва; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2015. — 64 с.
Nesterov E. S. Extreme waves in oceans and seas. Moscow, Obninsk, 2015, 64 p. Available at: <https://method.meteorf.ru/publ/books/nester.pdf>. (In Russian).
6. 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.
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).

7. Marchenko A., Wadhams P., Collins C., Rabault J., Chumakov M. Wave-ice interaction in the North-West Barents Sea. *Applied Ocean Research*, 2019, vol. 90. DOI: 10.1016/j.apor.2019.101861.
8. Ardhuin F., Gille S. T., Menemenlis D., Rocha C. B., Rasche N., Chapron B., Gula J., Molemaker J. Small-scale open ocean currents have large effects on wind wave heights. *J. Geophys. Res. Oceans*, 2017, vol. 122. DOI: 10.1002/2016JC012413.
9. Нестеров Е. С. Ветровое волнение в арктических морях (обзор) // Гидрометеор. исследования и прогнозы. — 2020. — № 3 (377). — С. 19—41. — DOI: 10.37162/2618-9631-2020-3-19-41.
Nesterov E. S. Wind waves in the Arctic seas. *Hydro-meteorological research and forecasts*, 2020, no. 3 (377), pp. 19—41. Available at: <https://method.meteorf.ru/publ/tr/tr377/02.pdf>. (In Russian).
10. Stopa J., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F. Wave climate in the Arctic 1992—2014: seasonality and trends. *Cryosphere*, 2016, vol. 10 (4), pp. 1605—1629.
11. Semedo A., Vettor R., Breivik O., Sterl A., Reistad M., Soares C. G., Lima D. The wind sea and swell waves climate in the Nordic seas. *Ocean Dynam.*, 2014, vol. 65, pp. 223—240. DOI: 10.1007/s10236-014-0788-4, 2014.
12. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. РД 52.88.699-2008. — М., 2008.
Regulation on the procedure for actions of institutions and organizations in the event of a threat of occurrence and occurrence of hazardous natural phenomena RD 52.88.699-2008. Moscow, 2008. (In Russian).
13. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. — М.: Рос. мор. регистр судоходства, 2003. — 213 с.
Reference data on the wind and wave regime of the Barents, Okhotsk and Caspian seas. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2003, 213 p. (In Russian).
14. Rojo M., Claud C., Noer G., Carleton A. M. In Situ Measurements of Surface Winds, Waves, and Sea State in Polar Lows Over the North Atlantic. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2019, vol. 124, pp. 700—718.
15. Yurovskaya M., Kudryavtsev V., Chapron B. Spatial Probability Characteristics of Waves Generated by Polar Lows in Nordic and Barents Seas. *Remote Sens*, 2023, vol. 15, p. 2729. DOI: 10.3390/rs15112729.
16. Orimolade A. P., Furevik B. R., Noer G., Gudmestad O. T., Samelson R. M. Waves in polar lows. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 2016., vol. 121, pp. 6470—6481.
17. SWAN: Scientific and technical documentation. SWAN Cycle III version 41.20A, 2018. 147 p.
18. Bilgili A., Smith K. W. BatTri: a 2-D finite element grid generator, version 11.11.03. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.09.007.
19. GEBCO Compilation Group. GEBCO 2023 Grid. Distributed by OpenTopography. Available at: <https://doi.org/10.5069/G9D21VTT>.
20. Панасенкова И. И., Фомин В. В., Дианский Н. А. Воспроизведение гидротермодинамических характеристик Западно-Арктических морей России с усвоением данных по температуре поверхности моря и сплоченности ледяного покрова // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* — 2025. — № 22. — URL: <http://vmu.phys.msu.ru/abstract/2025/2/2520902/>. — В печати.
Panasenkov I. I., Fomin V. V., Diansky N. A. Reproduction of hydrothermodynamic characteristics of the Russian Western Arctic Seas with assimilation of sea surface temperature and sea ice concentration data. *Moscow University Physics Bulletin*, 2025, Iss. 2. In print.
21. Дианский Н. А., Фомин В. В., Кабатченко И. М., Грузинов В. М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // *Арктика: экология и экономика.* — 2014. — № 1 (13). — С. 57—73.
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, no. 1 (13), pp. 57—73. (In Russian).
22. Фомин В. В., Панасенкова И. И., Гусев А. В. и др. Система оперативного моделирования Северного Ледовитого океана и прилегающих к нему акваторий на основе российской модели INMOM-Арктика // *Арктика: экология и экономика.* — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 205—218. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-205-218.
Fomin V. V., Panasenkov I. I., Gusev A. V., Chaplygin A. V., Diansky N. A. Operational forecasting system for Arctic Ocean using the Russian marine circulation model INMOM-Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 205—218. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-205-218. (In Russian).
23. Stoll P. J. A global climatology of polar lows investigated for local differences and wind-shear environments. *Weather and Climate Dynamics*, 2022, vol. 3 (2), pp. 483—504. DOI: 10.5194/wcd-3-483-2022.
24. Руководство по гидрологической практике. — Т. II: Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. — Женева: ВМО, 2012. — 324 с. — ВМО № 168.
Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. Sixth edition, 2009, 302 p. WMO No. 168. Available at: https://www.hydrology.nl/images/docs/hwrrp/WMO_Guide_168_Vol_II_en.pdf.
25. Yue S., Pilon P. A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. *Hydrological Sciences*, 2004, vol. 49 (1), pp. 21—37.
26. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. of the American Statistical Association*, 1968, vol. 63, pp. 1379—1389.

Информация об авторах

Чумаков Михаил Михайлович, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отдела, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (142717, Россия, Московская обл., Ленинский г. о., пос. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1), e-mail: chumakovmm@ya.ru.

Шушпанников Павел Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (142717, Россия, Московская обл., Ленинский г. о., пос. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1), e-mail: P_Shushpannikov@vniigaz.gazprom.ru.

Фомин Владимир Васильевич, заведующий лабораторией, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6); старший научный сотрудник, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., д. 11-13); научный сотрудник, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8), e-mail: vladimirfomin@live.com.

Панасенкова Ирина Игоревна, научный сотрудник, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6); младший научный сотрудник, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., д. 11-13), e-mail: ipanasenkova@mail.ru.

Нуриев Марат Фаритович, заместитель начальника управления департамента ПАО «Газпром» (197229, Россия, Санкт-Петербург, Лахтинский просп, д. 2, корп. 3, стр. 1 (Башня) МФК «Лахта Центр»), e-mail: m.nuriyev@adm.gazprom.ru.

Дианский Николай Ардальянович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, доцент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1); заведующий отделом, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6); главный научный сотрудник, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8), e-mail: nikolay.diansky@gmail.com.

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY STUDY OF EXTREME WIND WAVES IN THE CENTRAL PART OF THE BARENTS SEA

**Chumakov, M. M.¹, Shushpannikov, P. S.¹, Fomin, V. V.^{2,3,4},
Panassenkova, I. I.^{2,2}, Nuriyev, M. F.⁵, Diansky, N. A.^{2,4,6}**

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC (Saint Petersburg, Russian Federation)

² N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet (Moscow, Russian Federation)

³ Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)

⁴ Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

⁵ PJSC Gazprom (Saint Petersburg, Russian Federation)

⁶ Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

The article was received on March 19, 2025

For citing

Chumakov M. M., Shushpannikov P. S., Fomin V. V., Panassenkova I. I., Nuriyev M. F., Diansky N. A. Spatiotemporal variability study of extreme wind waves in the central part of the Barents Sea. Arctic: Ecology and Economy, 2026, vol. 16, no. 1, pp. 28—39. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-28-39. (In Russian).

Abstract

Based on the results of retrospective wave modeling conducted for the Barents Sea from 1981 to 2022, the authors analyzed extreme wave characteristics for the central part of the Barents Sea using the SWAN model. The spatial resolution of the SWAN model in the central part of the Barents Sea was 1 km, and 3.5 km on its periphery. An analysis of storm situations was carried out for the central part of the sea. Storms with a wind speed of more than 15 m/s, as well as periods of storm waves, in which the wave height was 2.5 m or more, were identified. It was shown that situations were possible when the development of extreme waves in one area of the central

part of the sea was not accompanied by extreme waves in another. High spatial variability in wave heights was observed, associated with both storm intensity and cyclone trajectories. It was found that during the periods of the most intense cyclones, the peak value of the wave spectrum was 15.4 s, and the average period of the waves was 11.5 s, which indicated a significant contribution of swell waves to the formation of extreme waves.

The distribution of storm duration values was bimodal. Storm waves corresponding to the first group lasted 55 — 67 hours and were formed during the passage of isolated cyclones. The duration of the second group was 166—169 hours and storm waves were formed during the passage of a system of two or more simultaneously occurring cyclones. It was revealed that storm waves in the water area began significantly earlier than wind speeds reached gale force (15 m/s). This suggested that the development of storm waves at relatively low wind speed might serve as a harbinger of the coming cyclone.

In the area of the points under consideration, a weak positive trend in average and maximum monthly mean daily significant wave heights was observed only in the last two decades, and only between April and June. The increase in average monthly mean daily significant wave heights over the past 24 years has amounted to no more than 72 cm. However, the increase in maximum mean daily wave heights has reached almost 1 m.

Keywords: *Barents Sea, retrospective modeling, intense cyclones, storm waves, Mann-Kendall test, Theil-Sen elevation function.*

Information about the authors

Chumakov, Mikhail Mikhailovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of Department, Gazprom VNIIGAZ LLC (1, Bld. 15, Gazovikov St., Razvilka, Leninsky Ave., Moscow Region, Russia, 142717), e-mail: chumakovmm@ya.ru.

Shushpannikov, Pavel Sergeevich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Gazprom VNIIGAZ LLC (1, Bld. 15, Gazovikov St., Razvilka, Leninsky Ave., Moscow Region, Russia, 142717), e-mail: P_Shushpannikov@vniigaz.gazprom.ru.

Fomin, Vladimir Vasil'evich, Head of Laboratory, N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet (6, Kropotkinsky Lane, Moscow, Russia, 119034), Senior Researcher, Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation (11-13, Bolshoi Predtechenskiy Lane, Moscow, Russia, 123242), Researcher, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences (8, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: vladimirfomin@live.com.

Panasenkova, Irina Igorevna, Researcher, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet (6, Kropotkinsky Lane, Moscow, Russia, 119034), Junior Researcher, Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation (11-13, Bolshoi Predtechenskiy Lane, Moscow, Russia, 123242), e-mail: ipanasenkova@mail.ru.

Nuriyev, Marat Faritovich, Deputy Head of the Department's Office, PJSC Gazprom (1-3, Bld. 2, Lakhtinsky Ave., Lakhta Centre, Saint Petersburg, Russia, 197229), e-mail: m.nuriyev@adm.gazprom.ru.

Diansky, Nikolay Ardalianovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Associate Professor, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), Head of Department, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet (6, Kropotkinsky Lane, Moscow, Russia, 119034), Chief Researcher, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences (8, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: nikolay.diansky@gmail.com.