

АНАЛИЗ ВЫСОТЫ ВЕТРОВЫХ ВОЛН И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА ВДОЛЬ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ С 1979 ПО 2021 Г.

С.А. Мысленков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: stasoccean@gmail.com

Работа посвящена анализу ветровых волн в арктических морях России вдоль Северного морского пути (СМП). Данные о параметрах ветрового волнения получены на основе спектральной модели WAVEWATCH III, о ветре и концентрации морского льда – из реанализа NCEP/CFRS/CFRSv2 за период с 1979 по 2021 г. Получены оценки распределения средней, максимальной и 95-го перцентиля высоты значительных волн и продолжительности безледного периода вдоль двух вариантов маршрута по СМП с шагом по пространству ~20 км. Также получены оценки трендов для рассматриваемых параметров за 43 года.

Минимальное значение продолжительности безледного периода составляет около 30 суток и наблюдается на северном маршруте СМП в Восточно-Сибирском море. На южном маршруте минимальная продолжительность не опускается ниже 65 суток. Среднеголетняя высота волн в безледный период превышает 2 м в Баренцевом море, 1,6 м в Чукотском и не превышает 1,2 м на остальном протяжении маршрута. Максимальная высота волн и 95-й перцентиль высоты волн существенно меньше на южном маршруте.

На всем протяжении СМП тренды для продолжительности безледного периода положительны и составляют 15–20 суток за 10 лет, а максимальные значения тренда наблюдаются к северу от Новой Земли и составляют 52 дня за 10 лет. Минимальные значения трендов продолжительности безледного периода наблюдаются в районе пролива Вилькицкого и в северо-восточной части Карского моря. Максимальный тренд для высоты волн в безледный период наблюдается в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигает 0,33 м за 10 лет на северном и 0,12 м за 10 лет на южном маршрутах СМП.

Ключевые слова: ветровое волнение, Арктика, WAVEWATCH III

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.11

ВВЕДЕНИЕ

В связи с климатическими и геополитическими изменениями развитие альтернативных торговых маршрутов в Арктике становится все более актуальным. Перевозка грузов из стран Восточной и Юго-Восточной Азии в Европейский союз через СМП занимает существенно меньшее время по сравнению с традиционным маршрутом через Суэцкий канал [Зеленков, 2019]. Под акваторией СМП понимается водное пространство, прилегающее к северному побережью России, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону России [Осипова и др., 2019]. В работе [Тойменцева, Федоренко, 2023] описаны перспективы развития транспортно-логистической инфраструктуры СМП в контексте программы развития программы «Один пояс, один путь». Активное развитие Северного морского пути уже позволило увеличить грузооборот за 2020 г. до 33 млн т [Гурлев и др., 2022]. За последние 20–30 лет во многих областях Арктики регистрируется увеличение температуры воды и воздуха, сокращение площади льдов и другие климатические изменения [Алексеев и др., 2015; Ого-

родов и др., 2022; Ростов и др., 2019; Шалина, 2015; Ivanov, 2023]. В результате климатических изменений, связанных с увеличением продолжительности безледного периода (ПБП), уже в среднесрочной перспективе возможный рост объема перевозок по СМП может достигнуть 50 млн т в год [Вороница и др., 2017]. Одной из основных проблем для грузоперевозок по СМП являются низкие значения ПБП, связанные с тяжелой ледовой обстановкой [Зеленков, 2019].

По спутниковым данным средняя ПБП для СМП в 1980–2013 гг. составляла 80 суток [Мохов, Хон, 2015]. Особенности распределения сплоченности льдов и их динамики с 1997 по 2018 г. приведены в [Третьяков и др., 2019]. Устойчивые тенденции к увеличению ПБП в прибрежной зоне Карского моря за период 1979–2019 гг. со средним темпом в 12 сут./10 лет получены в работе [Шабанов, 2022]. В работе [Шалина, 2015] показано уменьшение сплоченности льда на трассе СМП в летние месяцы и практически полное освобождение трассы ото льда в сентябре с 2008 по 2012 г. Интегральные оценки продолжительности навигационного периода, когда открытая вода наблюдается более чем на

80–90% от общей длины трассы СМП, приведены в работах [Кибанова и др., 2018; Khon et al., 2017].

Согласно прогностическим расчетам на основе климатических моделей при сценарии умеренных антропогенных воздействий можно ожидать увеличения средних значений продолжительности навигационного периода к середине XXI в. до 4–5 мес., а к концу века – около 5 мес. и более [Мохов и др., 2016]. Оценки ожидаемой продолжительности навигационного периода на СМП составляют 2–3 мес. в середине XXI в. и 3–6 мес. в конце XXI в. [Кибанова и др., 2018].

Анализ ветрового волнения в арктических морях на основе спутниковых данных и модельных расчетов для современного климата представлен в работах [Нестеров, 2020; Вражкин, 2017; Плотников и др., 2020]. В этих работах приведены оценки распределения режимных и экстремальных характеристик волнения на акватории морей в основном в виде карт и таблиц.

В работах [Carbal et al., 2022; Li et al., 2019; Sharmar et al., 2021; Waseda et al., 2018] приведены оценки трендов площади льда, высоты волн и скорости ветра для Арктики в целом, отмечено также, что ледяной покров уменьшается и одновременно высота волн увеличивается. В [Li et al., 2019] проведено моделирование волнения с 2007 по 2018 г. для летнего периода (май–сентябрь) и показаны положительные тренды для высоты волн в целом для Арктики и в частности для Карского и Чукотского морей и моря Бофорта. В [Waseda et al., 2018] на основе реанализа ERA-Interim получены положительные тренды для максимальной высоты значительных волн и скорости ветра в морях Лаптевых и Бофорта.

В работе [Мохов, Погарский, 2021] модель WAVEWATCH III использовалась для воспроизведения полей ветровых волн в Арктике на основе концентрации морских льдов и приповерхностного ветра из глобальных климатических моделей ансамбля CMIP5.

Традиционно результаты моделирования ветрового волнения и данные реанализов представляются в виде карт пространственного распределения тех или иных характеристик, а также графиков и диаграмм в отдельных точках. С другой стороны, представляется важным анализ параметров волнения вдоль побережий или морских судоходных путей. Подобные варианты визуализации параметров ветрового волнения даны для побережья Балтийского моря в [Soomere, Eelsalu, 2014] и для европейских маршрутов морского транспорта [Chiroșcă, Rusu, 2022].

Таким образом, ранее анализ параметров ветровых волн, ПБП и их тренды для Арктики были

получены только в виде обзорных карт. Непосредственно для СМП были получены только средние интегральные оценки либо для всего маршрута, либо средние для его участков по каждому морю.

В данной работе по данным реанализа и результатов модели ветрового волнения за период с 1979 по 2021 г. представлен анализ высоты волн и продолжительности безледного периода вдоль двух маршрутов СМП с шагом ~20 км. Получены оценки трендов для параметров волнения и для ПБП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа характеристик ветрового волнения в морях Российской Арктики использовалась база данных, полученная ранее на основе данных моделирования [Myslenkov et al., 2021; Мысленков, 2023]. При создании базы данных использовалась волновая модель WAVEWATCH III 6.07 и схема генерации волн ST6 для учета влияния льда схема IC0 [Tolman, 2019]. Расчеты проводились с использованием неструктурных сеток с высоким разрешением в прибрежной зоне. При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979–2010) с пространственным разрешением ~0,3° и реанализа NCEP/CFSv2 (2011–2019) с разрешением ~0,2°.

При оценке качества модели в Карском море на основе спутниковых данных и прямых измерений на станции получено, что коэффициент корреляции для высоты значительных волн составляет ~0,9, среднеквадратическое отклонение от 0,32 до 0,39 м. В морях восточного сектора Российской Арктики коэффициент корреляции составил 0,95, систематическая ошибка –0,05 м, среднеквадратическая ошибка – 0,27 м, коэффициент рассеяния – 0,16 [Myslenkov et al., 2023; Мысленков, 2023].

Анализ параметров ветрового волнения осуществлялся для двух условных маршрутов через акваторию СМП, которые в данной статье обозначены как северный и южный маршруты СМП (рис. 1А). Маршруты были выбраны на основе карты СМП с набором маршрутов, представленной в статье [Осипова и др., 2019].

Методика обработки и анализа данных выглядела следующим образом: из базы данных ветрового волнения для каждой точки вдоль обоих маршрутов по СМП выбирались данные о высоте значительных волн с шагом 3 часа за период с 1979 по 2021 г. (43 года). Далее анализ данных был проведен в каждой точке отдельно для среднемноголетних значений и для трендов среднегодовых значений за 43 года.

На первом этапе было выполнено осреднение данных по высоте значительных волн для каждой

точки обоих маршрутов, расчет максимального значения и 95-го перцентиля за весь период. Необходимо отметить, что, согласно схеме учета льда в модели, узел с концентрацией льда более 0,5 считается покрытым льдом и высота волны составляет 0 м. Далее для каждого узла вдоль маршрутов была рассчитана среднеголетняя ПБП, когда высота волн была более 0 м. Следовательно, в среднеголетних значениях учитывалась высота 0 м в период присутствия льда. Также для каждого узла была рассчитана среднеголетняя высота волн в безледный период (т. е. без учета значений 0 м при наличии льда).

На втором этапе были рассчитаны средние за год значения для высоты значительных волн, высоты волн в безледный период, максимума и 95-го перцентиля для каждого узла за каждый год. Далее на основе регрессионного анализа были получены оценки линейных трендов указанных величин за 43 года. Тренды вычислялись в сутках или метрах за 10 лет. Оценка значимости трендов выполнена по критерию Стьюдента и статистически значимыми признавались результаты при p -значении вероятности для нулевой гипотезы менее 0,05.

Визуализация результатов выполнена в виде столбчатых диаграмм отдельно для северного и южного маршрутов с запада на восток с шагом ~20 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ среднеголетних значений высоты волн и продолжительности безледного периода. Распределение среднеголетней высоты волн на акватории морей Российской Арктики и расположение северного и южного маршрутов представлены на рис. 1А. Картограмма выполнена в проекции Меркатора, что позволяет удобно сопоставлять столбчатые диаграммы на рис. 1Б–1Е, построенные с запада на восток с долготой по оси X .

Результаты расчета среднеголетних значений для высоты значительных волн, максимального значения и 95-го перцентиля вдоль северного маршрута представлены на рис. 1Б–1Е. ПБП в Карском море составляет от 150 суток на границе с Баренцевым морем до 50 суток в районе пролива Вилькицкого (см. рис. 1Б). В море Лаптевых ПБП составляет от 50 до 90 суток. Минимальные значения ПБП составляют около 30 суток на северном маршруте СМП и наблюдаются в Восточно-Сибирском море. В Чукотском море ПБП увеличивается к Берингову проливу до 200 суток. В Баренцевом море лед присутствует только в его северной части. Стандартное отклонение ПБП вдоль маршрута составляет 40–50 суток с максимумом 85 суток к северу от Новой Земли (см. рис. 1Б).

Среднеголетняя высота волн составляет 1–2,1 м в Баренцевом море, до 0,7 м в Чукотском море и на севере Карского моря, в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море 0,1–0,2 м (см. рис. 1В). Небольшие значения высоты волны обусловлены длительным ледовым сезоном, поэтому для анализа больший интерес представляет среднеголетняя высота волн в безледный период (см. рис. 1Г). Стандартное отклонение для высоты волн в безледный период принимает значения около 0,15 м в Баренцевом море, а далее на восток составляет примерно половину от высоты волн (см. рис. 1Г). Для этой характеристики минимальные значения ~0,5 м наблюдаются в проливе Вилькицкого, на большей части акваторий Карского, Восточно-Сибирского морей и моря Лаптевых среднеголетняя высота волн в безледный период составляет 0,8–1 м, а в Чукотском море достигает 1,5 м. 95-й перцентиль высоты волн убывает с запада на восток от 5 м в Баренцевом море до 0,8 м в проливе Вилькицкого (см. рис. 1Д). Максимальная высота волн достигает 14 м в Баренцевом море, 7,3 м в Чукотском море (см. рис. 1Е).

Результаты расчета средних характеристик для высоты значительных волн на южном маршруте представлены на рис. 2. Распределение среднеголетней энергии волн на акватории морей Российской Арктики показано на рис. 2А. Максимальные значения потока волновой энергии более 30 кВт/м наблюдаются на западе Баренцева моря, на севере Карского моря этот показатель составляет около 2–3 кВт/м, в Чукотском море – 3–4 кВт/м, а в остальных районах исследуемой акватории – до 1 кВт/м. В целом полученные результаты для южного маршрута весьма схожи с результатами для северного маршрута, поэтому далее остановимся только на основных различиях.

Прежде всего, надо отметить, что ПБП на южном маршруте в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море не опускается ниже 65 сут., а в среднем составляет около 70–75 сут. (см. рис. 2Б). В Восточно-Сибирском море это приблизительно в 2 раза больше, чем на северном маршруте (см. рис. 2Б). Стандартное отклонение ПБП вдоль южного маршрута, как правило, не превышает 50 суток. Высота волн в безледный период на южном маршруте немного меньше в Карском и Чукотском морях, чем на северном (см. рис. 2Г).

Максимальная высота волн и 95-й перцентиль высоты волн на южном маршруте существенно меньше в районе 140–145° в. д., так как маршрут проходит южнее Новосибирских островов, которые препятствуют развитию штормового волнения (см. рис. 2Д, 2Е).

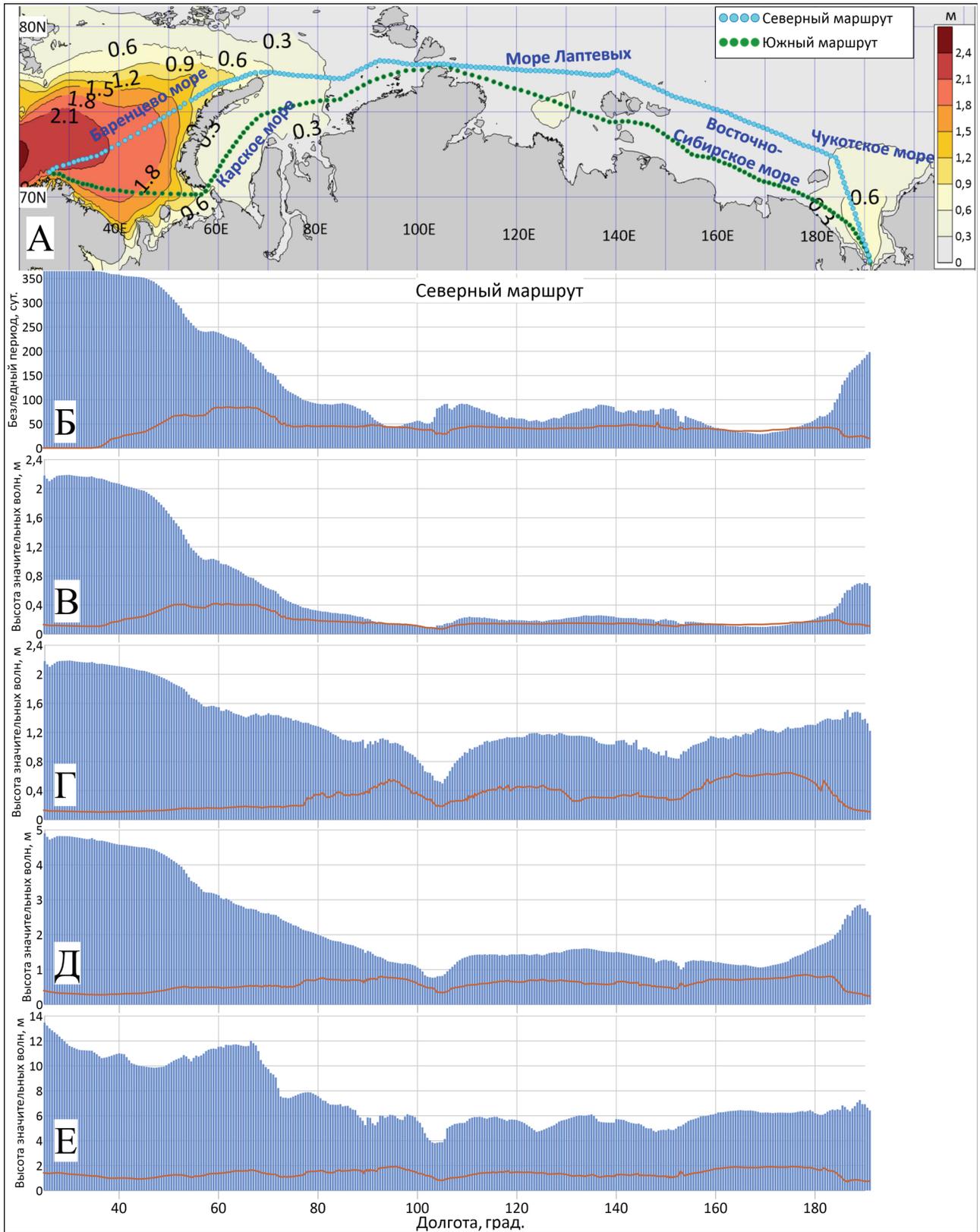


Рис. 1. Распределение параметров ветрового волнения вдоль северного маршрута Северного морского пути: А – среднегодовая высота волн на акватории морей Российской Арктики; Б – продолжительность безледного периода; В – среднегодовая высота волн; Г – среднегодовая высота волн в безледный период; Д – 95-й перцентиль высоты волн; Е – максимальная высота волн. Линией представлена величина стандартного отклонения для каждого из параметров

Fig. 1. Distribution of wind wave parameters along the northern variant of the North Sea Route: А – average annual wave height in the Russian Arctic; Б – ice-free period; В – average annual wave height; Г – average wave height during the ice-free period; Д – 95th percentile of wave height; Е – maximum wave height. The line represents the value of the standard deviation for each of the parameters

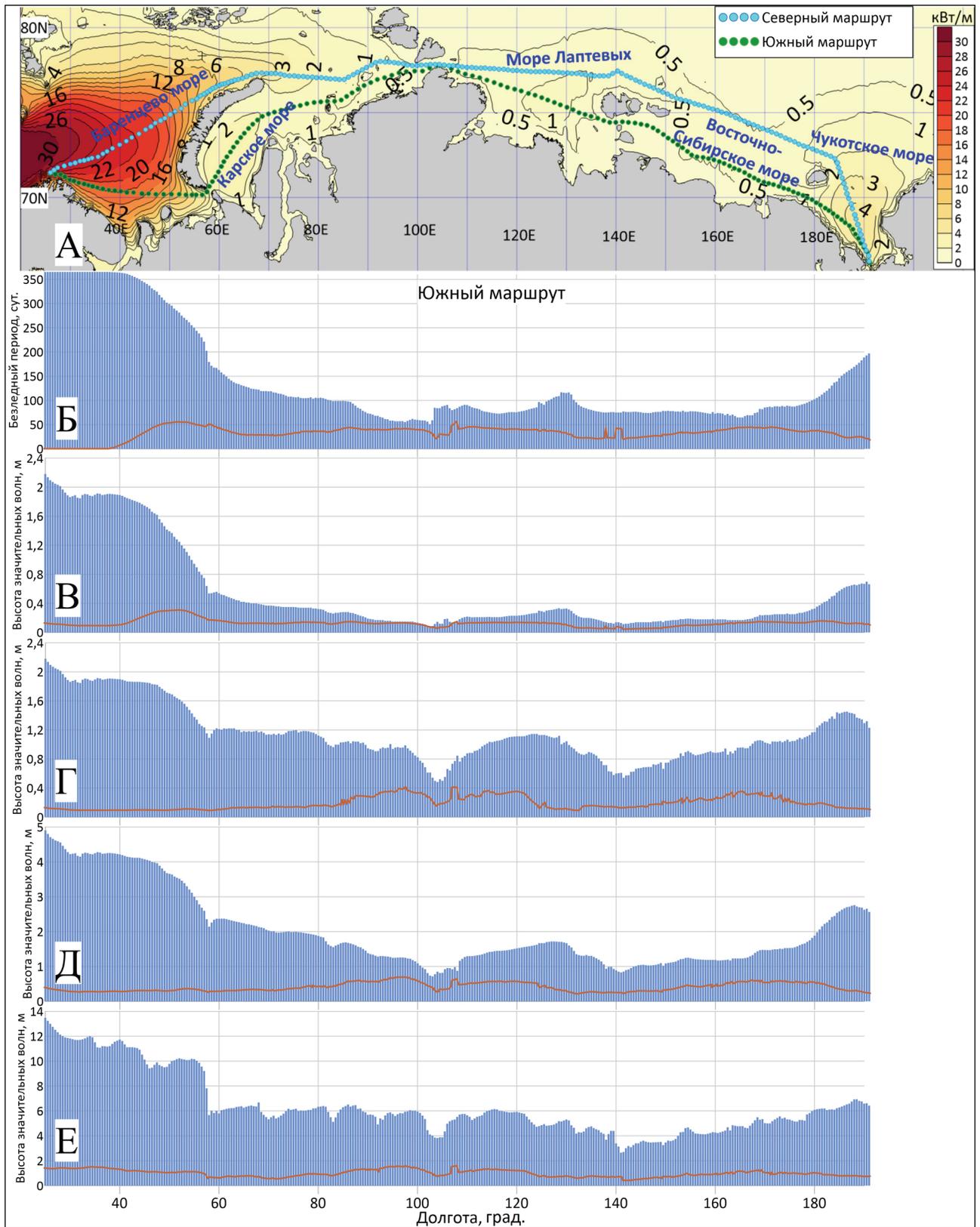


Рис. 2. Распределение параметров ветрового волнения вдоль южного маршрута Северного морского пути: А – среднегодовое энергия волн на акватории Арктических морей; Б – продолжительность безледного периода; В – среднегодовое высота волн; Г – среднегодовое высота волн в безледный период; Д – 95-й перцентиль высоты волн; Е – максимальная высота волн. Линией представлена величина стандартного отклонения для каждого параметра

Fig. 2. Distribution of wind wave parameters along the southern variant of the North Sea Route: А – average annual wave energy in the Russian Arctic; Б – ice-free period; В – average annual wave height; Г – average wave height during the ice-free period; Д – 95th percentile of wave height; Е – maximum wave height. The line represents the value of the standard deviation for each of the parameters

Полученные результаты могут быть использованы как режимные и экстремальные значения высоты волн при планировании грузоперевозок по СМП. В основном находящиеся на СМП суда предназначены для эксплуатации в открытом океане и выдерживают высоту волн более 8 м. Однако, высота волн более 2–4 м может оказаться критической при таких сложных операциях, как буксировка буровых платформ или перевозка опасных грузов. Критические значения по высоте волн указаны в правилах разработки и проведения морских операций Российского морского регистра судоходства [Правила..., 2022].

Анализ трендов для высоты волн и продолжительности безледного периода. Далее рассмотрим результаты анализа трендов для различных характеристик волнения и ПБП для северного и южного маршрутов. Распределение максимальной высоты значительных волн представлено на рис. 3А. Максимальная высота волн составляет 12 м и наблюдается на западе Баренцева моря, в Карском и Чукотском морях – 7–8 м, а в море Лаптевых и Восточно-Сибирском – 5–6 м. Вдоль северного маршрута максимальный тренд для ПБП наблюдается в Баренцевом море к северу от Новой Земли и составляет до 52 дней за 10 лет. Эти результаты в целом согласуются с оценками, приведенными в работе [Sharmar et al., 2021]. На всем протяжении СМП тренды ПБП положительны и составляют 15–20 суток (рис. 3Б). Минимальные значения трендов наблюдаются в районе пролива Вилькицкого и в северо-восточной части Карского моря. Тренды для среднегодовой высоты волн практически точно повторяют картину трендов для ПБП (рис. 3В), так как в расчетах учитываются нулевые значения при присутствии льда. Однако в западной части Баренцева моря наблюдается слабый отрицательный тренд, указывающий на отсутствие роста волн в незамерзающей части Баренцева моря, что было отмечено в работе [Myslenkov et al., 2023].

Наибольший интерес представляют тренды для среднегодовой высоты волн в безледный период (рис. 3Г). В Баренцевом море, несмотря на большой тренд на увеличение безледного периода, тренды для высоты волны не превышают 0,06 м за 10 лет. В Карском море и море Лаптевых тренды 0,1–0,18 м за 10 лет. Максимальный тренд наблюдается в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигает 0,33 м за 10 лет. В Чукотском море тренд уменьшается от 0,18 м на севере до 0,03 м на юге (см. рис. 3Г). В работах [Carbal et al., 2022; Li et al., 2019] утверждается, что уменьшение площади льдов в Арктике и увеличение ПБП приводит к росту высоты волн из-за увеличения разгона. Это действительно подтверждается и нашими результатами, однако величина трендов для высоты волны существенно отличается для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, тогда

как тренды для ПБП для них практически одинаковы. В данном случае необходимо рассматривать дополнительно тренды для скорости ветра (они могут иметь другое направление или отсутствовать) и преобладающее направление ветра, так как если ветер в основном дует от открытой воды в сторону кромки льда, то разгон при отступании льда не играет роли для роста волн. Последнее, по всей видимости, объясняет практически нулевые тренды для высоты волн в безледный период в северной части Баренцева моря (см. рис. 3Г).

Тренды для высоты волн 95-го перцентиля и максимальной высоты волн представлены на рис. 3Д, 3Е. В Баренцевом море к западу от 40° в. д. тренды для этих показателей слабые и отрицательные. Так как эта часть Баренцева моря преимущественно не замерзает, то наблюдаемые тренды объясняются слабыми и отрицательными трендами в скорости ветра как в Баренцевом море, так и в Северной части Атлантического океана [Carbal et al., 2022; Sharmar et al., 2021]. Далее к востоку по всему маршруту тренд для 95-го перцентиля высоты волн составляет около 0,2–0,3 м за 10 лет и 0,4–0,6 м за 10 лет для максимальной высоты волн. Максимальные значения наблюдаются в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигают 0,48 м для 95-го перцентиля и 1,1 м для максимальной высоты волн. Эти достаточно большие значения указывают на то, что максимальная высота волн за последние 40 лет увеличилась с 2 до 6 м в Восточно-Сибирском море. Такое увеличение объясняется, прежде всего, существенным увеличением ПБП в Восточно-Сибирском море, где в 1980-е гг. ПБП составляла около 10–20 дней, в некоторые годы открытой воды вообще не наблюдалось, а в последние годы ПБП достигает 3 месяцев. Следовательно, вероятность действия сильного ветра в отсутствие льда выросла

Распределение высоты волн 95-го перцентиля представлено на рис. 4А. Максимальные значения для этого показателя наблюдаются в Баренцевом море (до 5 м), до 2,5 м в Карском и Чукотском морях и небольшой локальный максимум 1,5 м – в море Лаптевых. Для южного маршрута тренды для различных характеристик волнения и ПБП представлены на рис. 4Б–4Е. Отметим основные отличия от трендов для северного маршрута, описанных выше. Тренд для ПБП в Баренцевом море не превышает 20 суток за 10 лет, так как маршрут проходит по южной части Баренцева моря (см. рис. 4Б). Высокие значения тренда (более 20 сут./10 лет) для ПБП, как и для северного маршрута, расположены в Восточно-Сибирском море. Низкие значения можно наблюдать в районе 140° в. д., южнее Новосибирских островов. Тренд для высоты волн в безледный период в Восточно-Сибирском море приблизительно

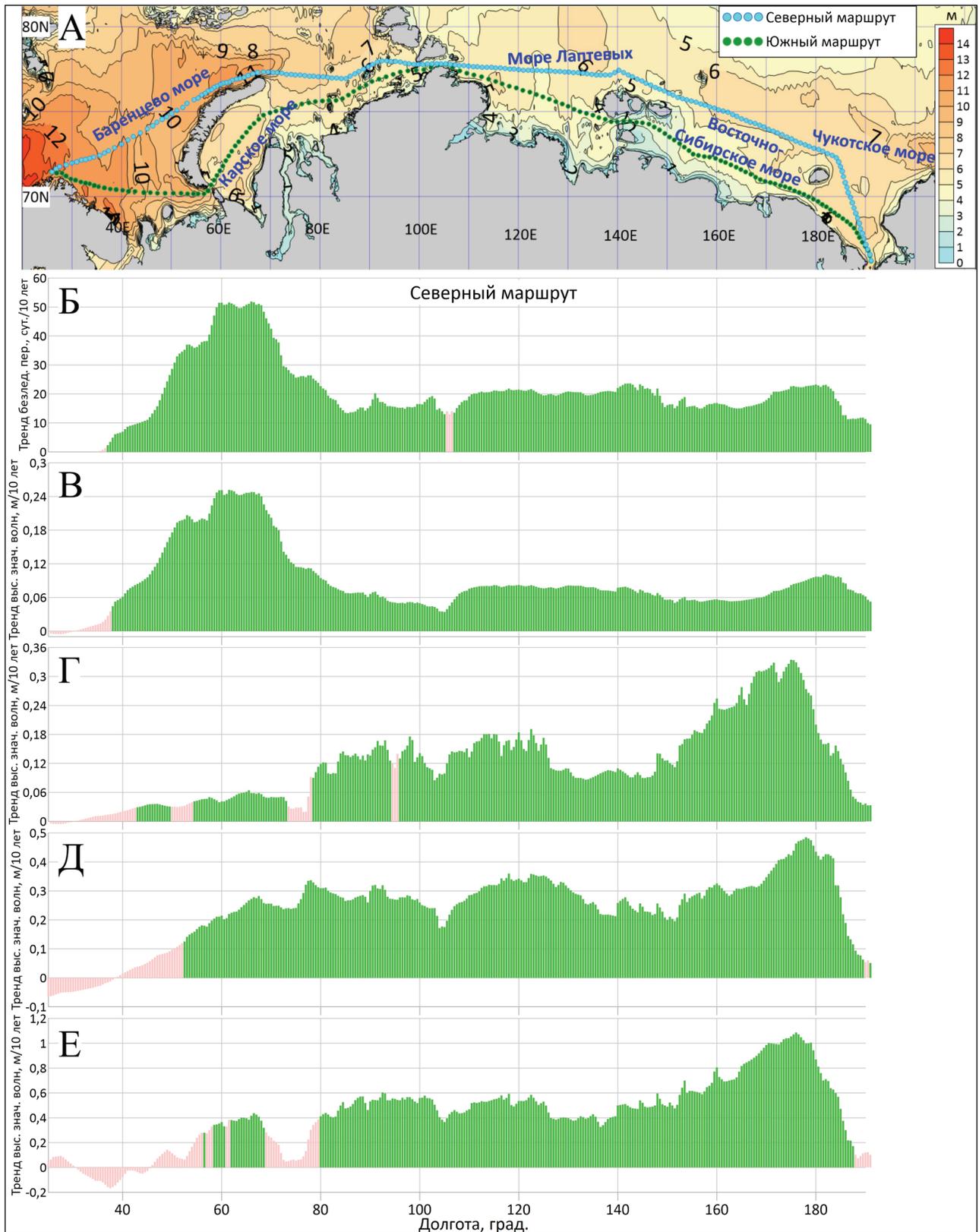


Рис. 3. Тренды параметров ветрового волнения вдоль северного маршрута Северного морского пути:

А – максимальная высота волн на акватории Арктических морей; Б – продолжительность безледного периода; В – среднееголетняя высота волн; Г – среднееголетняя высота волн в безледный период; Д – 95-ый перцентиль высоты волн; Е – максимальная высота волн. Зелеными столбцами обозначены значимые тренды (p -value < 0,05), розовыми – незначимые

Fig. 3. Trends in wind wave parameters along the northern variant of the North Sea Route:

A – maximum wave height in the Arctic Seas; Б – ice-free period; В – average annual wave height; Г – average wave height during the ice-free period; Д – 95th percentile of wave height; Е – maximum wave height. The green columns indicate significant trends (p -value < 0,05), the pink ones – insignificant

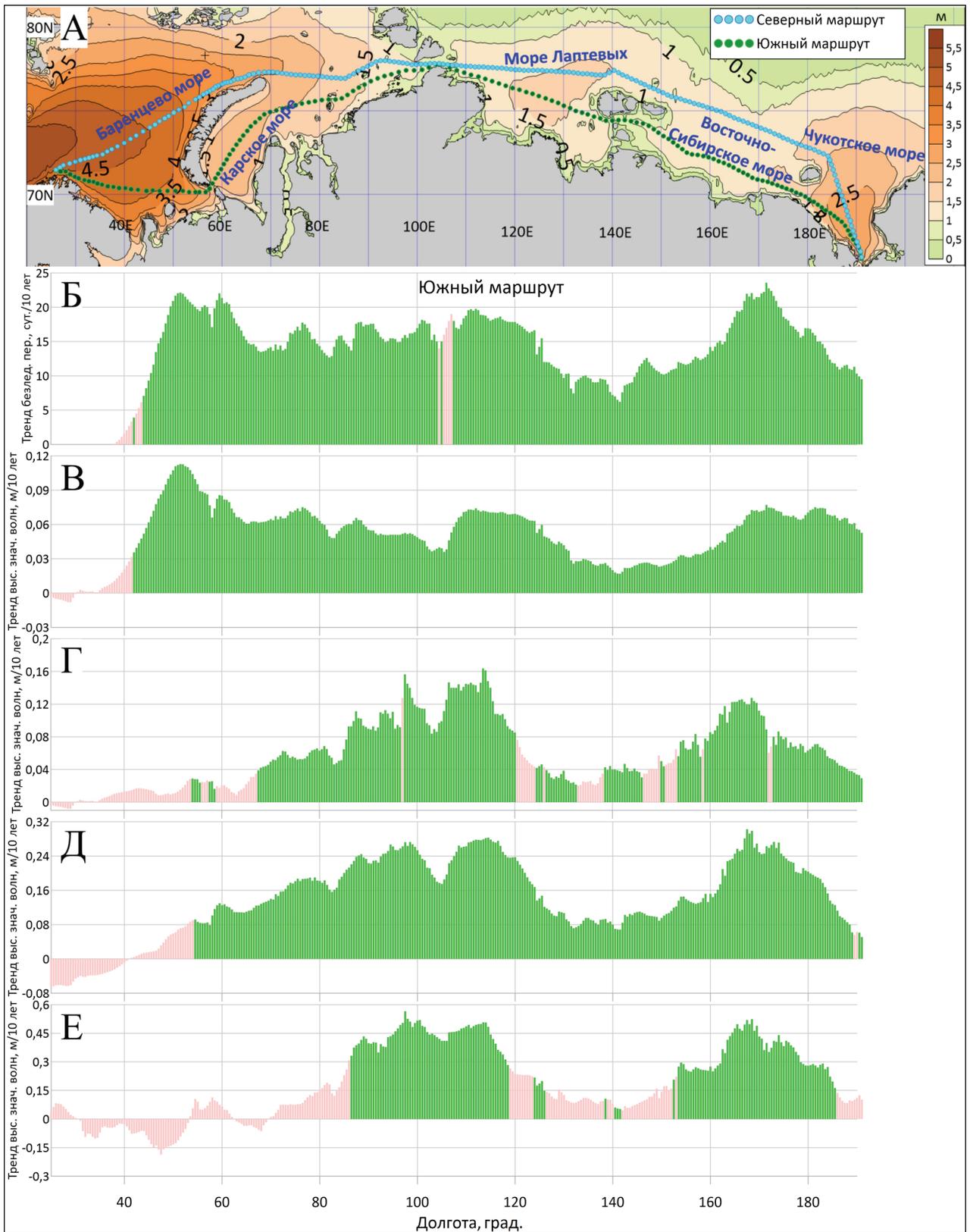


Рис. 4. Тренды параметров ветрового волнения вдоль южного маршрута Северного морского пути:
 А – 95-й перцентиль высоты волн на акватории Арктических морей; Б – продолжительность безледного периода;
 В – среднемноголетняя высота волн; Г – среднемноголетняя высота волн в безледный период; Д – 95-й перцентиль высоты волн;
 Е – максимальная высота волн. Зелеными столбцами обозначены значимые тренды ($p\text{-value} < 0,05$), розовыми – незначимые

Fig. 4. Trends in wind wave parameters along the southern variant of the North Sea Route:
 А – 95th percentile of wave height in the Arctic Seas; Б – ice-free period; В – average annual wave height; Г – average wave height during the ice-free period; Д – 95th percentile of wave height; Е – maximum wave height. The green columns indicate significant trends ($p\text{-value} < 0,05$), the pink ones – insignificant

в 3 раза меньше, чем для северного маршрута, и составляет 0,12 м за 10 лет. Тренды для максимальной высоты волн и 95-го перцентиля на южном маршруте также существенно меньше, чем на северном.

Результаты оценки значимости трендов в виде цветовой заливки присутствуют на рис. 3–4. Для ПБП все тренды значимы и для северного, и для южного маршрутов, кроме области в проливе Вилькицкого (и незамерзающей части Баренцева моря, где тренды отсутствуют). Тренды для максимальной высоты волн на северном маршруте незначимы с 25 по 58° с. ш., а также на границе Баренцева и Карского морей и на юге Чукотского моря. Тренды для высоты волн в безледный период на северном маршруте практически везде значимы, кроме западной части Баренцева моря и области в Карском море между 73–78° с. ш. Тренды для максимальной высоты волн на южном маршруте незначимы к западу от 85° с. ш., а также к югу от Новосибирских островов. Тренды для высоты волн в безледный период на южном маршруте незначимы к западу от 78° с. ш., а также к югу от Новосибирских островов.

В целом все основные максимумы в трендах для ПБП и для высоты волн в безледный период, найденные для моря Лаптевых, Восточно-Сибирского моря и к северо-западу от Новой Земли, оказались значимы.

ВЫВОДЫ

На основе спектральной волновой модели и метеорологического реанализа получены оценки среднесезонных значений для параметров ветровых волн и продолжительности безледного периода для акватории Северного морского пути. Для северного и южного маршрутов СМП получены оценки трендов для волновых параметров и ПБП за 43 года.

Среднее значение ПБП в Карском море составляет от 150 суток на границе с Баренцевым морем до 50 суток в районе пролива Вилькицкого. Минимальные значения ПБП около 30 суток наблюдаются на северном маршруте СМП в Восточно-Сибирском море. На южном маршруте в Восточно-Сибирском море ПБП приблизительно в 2 раза больше, чем на северном маршруте.

Среднесезонная высота волн в безледный период превышает 2 м в Баренцевом море, 1,6 м в Чукотском и не превышает 1,2 м на остальном протяжении маршрута. Максимальная высота волн и 95-й перцентиль высоты волн на северном маршруте существенно больше, чем на южном.

Практически все тренды для параметров волн и ПБП положительны на акватории СМП, кроме 95-го перцентиля и максимальной высоты волн на западе Баренцева моря. На всем протяжении СМП тренды ПБП составляют 15–20 суток за 10 лет, а максимальные значения тренда – 52 дня за 10 лет – наблюдаются к северу от Новой Земли. Минимальные значения трендов ПБП наблюдаются в районе пролива Вилькицкого и в северо-восточной части Карского моря. Максимальный тренд для высоты волн в безледный период наблюдается в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигает 0,33 м за 10 лет.

Максимальные значения тренда на северном маршруте наблюдаются в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигают 0,48 м за 10 лет для 95-го перцентиля и 1,1 м за 10 лет для максимальной высоты волн. Тренд для высоты волн в безледный период на южном маршруте в Восточно-Сибирском море приблизительно в 3 раза меньше, чем для северного маршрута, и составляет 0,12 м за 10 лет.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И. и др. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1(103). С. 33–41.
- Воронина С.А., Порфирьев Б. Н., Семикашев В.В. и др. Последствия изменений климата для экономического роста и развития отдельных секторов экономики Российской Арктики // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4(28). С. 4–17. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-4-17.
- Вражкин А.Н. Режим волнения морей восточной Арктики в начале XXI столетия // Труды ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155. С. 164–177.
- Гурлев И.В., Макоско А.А., Малыгин И.Г. Анализ состояния и развития транспортной системы Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 2(46). С. 258–270. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-258-270.
- Зеленков М.Ю. Транспортно-логистическая система Северного морского пути: перспективы, проблемы и пути их решения // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4(36). С. 131–140. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-131-140.
- Кибанова О.В., Хон В.Ч., Мохов И.И., Елисеев А.В. Изменения продолжительности навигационного периода Северного морского пути в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей: байесовские оценки // Доклады РАН. 2018. Т. 481. № 1. С. 89–94.
- Мохов И.И., Хон В.Ч. Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского

- пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. 2015. № 2(18). С. 88–95.
- Мохов И.И., Хон В.Ч., Прокофьева М.А. Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // Доклады РАН. Науки о Земле. 2016. Т. 468. № 6. С. 699–704.
- Мохов И.И., Погарский Ф.А. Изменения режимов морского волнения в Арктическом бассейне при изменениях климата в XXI веке по модельным расчетам // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 189–193. DOI: 10.31857/S2686739721020134.
- Мысленков С.А. Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 1(387). С. 87–101. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-1-87-101.
- Нестеров Е.С. Ветровое волнение в Арктических морях (обзор) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3(377). С. 19–41.
- Огородов С.А., Шабанова Н.Н., Кессель А.С. и др. Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2022. № 1. С. 26–42.
- Осипова Е.Э., Смирнов С.В., Хаирова Т.А. Предпосылки развития экспорта Российской Арктики, каботажных перевозок и проектных грузов для арктических проектов // Арктика и Север. 2019. № 37. С. 5–21. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2019.37.5.
- Плотников В.В., Вражский А.Н., Мезенцева Л.И. и др. Изменчивость гидрометеорологического режима морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское) в современный период // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 7. С. 103–115.
- Правила разработки и проведения морских операций НД № 2-090601-010. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2022. 142 с.
- Ростов И.Д., Ростова Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий моря Лаптевых за последние 37 лет // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2019. № 1. С. 97–107.
- Тойменцева И.А., Федоренко Р.В. Перспективы развития транспортно-логистической инфраструктуры Северного морского пути в рамках программы «один пояс, один путь» // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2023. Т. 2. № 1(51). С. 140–149. DOI: 10.51965/2076-7919_2023_2_1_140.
- Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Изменения ледовых условий плавания по маршруту Обская губа – Берингов пролив за 1998–2018 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 3. С. 65–75.
- Шабанов П.А. Изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 518–531.
- Шалина Е.В. Изменение ледовитости Северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 67. DOI: 10.7868/S0205961415040090.
- Cabral I.S., Young I.R., Toffoli A. Long-Term and Seasonal Variability of Wind and Wave Extremes in the Arctic Ocean, *Front. Mar. Sci.*, 2022, vol. 9, p. 80, DOI: 10.3389/fmars.2022.802022.
- Chiroșcă A.-M., Rusu L. Characteristics of the Wind and Wave Climate along the European Seas Focusing on the Main Maritime Routes, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10(1), p. 1–22, DOI: 10.3390/jmse10010075.
- Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change, *Atmosphere*, 2023, vol. 14, 409, DOI: 10.3390/atmos14020409.
- Khon V.C., Mokhov I.I., Semenov V.A. Transit Navigation through Northern Sea Route from Satellite Data and CMIP5 Simulations, *Environ. Res. Lett.*, 2017, vol. 12, 024010.
- Li J., Ma Y., Liu Q. et al. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, p. 102790, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov A. et al. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, vol. 13(5), 648, DOI: 10.3390/w13050648.
- Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A. et al. Wind waves web atlas of the Russian seas, *Water*, 2023, vol. 15(11), 2036, DOI: 10.3390/w15112036.
- Myslenkov S., E. Kruglova, A. Medvedeva et al. Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, vol. 23, no. 3, p. ES3002.
- Sharmar V., Markina M. Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980–2019, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2021, vol. 21(2), p. 1–11, DOI: 10.2205/2020ES000741.
- Soomere T., Eelsalu M. On the wave energy potential along the eastern Baltic Sea coast, *Renewable Energy*, 2014, vol. 71, p. 221–233.
- Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07, Tech. Note 333, March 2019, NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019.
- Waseda T., Webb A., Sato K. et al. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic ocean, *Sci. Reports*, 2018, vol. 8, 4489.

Поступила в редакцию 30.10.2023

После доработки 12.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

ANALYSIS OF THE WIND WAVES HEIGHT AND THE DURATION OF ICE-FREE PERIOD ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE FROM 1979 TO 2021

S.A. Myslenkov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Oceanology,
Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: stasocean@gmail.com*

The study deals with the analysis of wind waves in the Arctic seas of Russia along the Northern Sea Route. Data on wind wave parameters were obtained on the basis of the WAVEWATCH III spectral model, and data on wind and sea ice concentration for the period from 1979 to 2021 – from the NCEP/CFSR/CFSv2 reanalysis. Estimates of the distribution of the average, maximum and 95th percentile height of significant waves and the duration of ice-free period along two variants of the route along the Northern Sea Route (NSR) have been obtained with a space resolution of ~20 km. Trends of the parameters under consideration were also estimated for 43 years.

The minimum duration of ice-free period is about 30 days on the northern route of the NSR in the East Siberian Sea. The minimum duration on the southern route is never less than 65 days. The average annual wave height during the ice-free period exceeds 2 m in the Barents Sea, 1,6 m in the Chukchi Sea and is no more than 1,2 m for the rest of the route. The maximum wave height and the 95th percentile of wave height are significantly lower on the southern route.

The trends for the duration of the ice-free period are positive all along the NSR, and amount to 15–20 days per 10 years. The maximum trend values of 52 days per 10 years are observed north of the Novaya Zemlya Archipelago. The minimum values of trends for the ice-free period are observed in the area of the Vilkitsky Strait and in the northeastern part of the Kara Sea. The maximum trend for wave height during the ice-free period is observed in the eastern part of the East Siberian Sea reaching 0,33 m in 10 years on the northern and 0,12 m in 10 years on the southern route of the NSR.

Keywords: wind waves, Arctic, WAVEWATCH III

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project 23-27-00239).

REFERENCES

- Alekseev G.V., Radionov V.F., Aleksandrov E.I. et al. Izmene-nija klimata Arktiki pri global'nom potepnenii [Arctic climate change under global warming], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2015, no. 1(103), p. 33–41. (In Russian)
- Cabral I.S., Young I.R., Toffoli A. Long-Term and Seasonal Variability of Wind and Wave Extremes in the Arctic Ocean, *Front. Mar. Sci.*, 2022, vol. 9, p. 80, DOI: 10.3389/fmars.2022.802022.
- Chiroșcă A.-M., Rusu L. Characteristics of the Wind and Wave Climate along the European Seas Focusing on the Main Maritime Routes, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2022, 10.
- Gurlev I.V., Makosko A.A., Malygin I.G. Analiz sostojanija i razvitija transportnoj si-stemy Severnogo morskogo puti [Analysis of the state and development of the transport system of the Northern Sea Route], *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2022, t. 12, no. 2(46), p. 258–270. (In Russian)
- Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change, *Atmos-phere*, 2023, 14, 409, DOI: 10.3390/atmos14020409.
- Khon V.C., Mokhov I.I., Semenov V.A. Transit Navigation through Northern Sea Route from Satellite Data and CMIP5 Simulations, *Environ. Res. Lett.*, 2017, vol. 12, 024010.
- Kibanova O.V., Hon V.Ch., Mohov I.I., Eliseev A.V. Izmenenija prodolzhitel'nosti navi-gacionnogo perioda Severnogo morskogo puti v XXI veke po raschetam s ansamblem klimaticheskikh modelej: bajesovskie ocenki [Climate model-based changes of the navigation period duration at the north sea route in the 21st century: bayesian estimates], *Doklady Akademii nauk*, 2018, t. 481, vol. 1, p. 89–94. (In Russian)
- Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with re-treating ice cover in the Arctic, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, p. 102790, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.
- Mohov I.I., Hon V.Ch. Prodolzhitel'nost' navigacionnogo perioda i ee izmenenija dlja Severnogo morskogo puti: model'nye ocenki [The duration of the navigation period and changes for the northern sea route: model estimates], *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2015, vol. 2(18), p. 88–95. (In Russian)
- Mohov I.I., Hon V.Ch., Prokof'eva M.A. New model estimates of changes in the duration of the navigation period for the northern sea route in the 21st century, *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, no. 2, p. 641–645.
- Mohov I.I., Pogarskij F.A. Variations in the characteristics of sea waves in the arctic basin caused by climate changes in the 21st century based on model simulations, *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 496, no. 2, p. 164–167.
- Myslenkov S.A. Modelirovanie vetrovogo volnenija v more Laptevych, Vostochno-Sibirskom i Chukotskom morjah [Modeling of the wind waves in the Laptev, East Siberian and Chukchi seas], *Gidrometeorologicheskie issledovani-ja i prognozy*, 2023, no. 1(387), p. 87–101. (In Russian)
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov K. et al. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, 13(5), 648, DOI: 10.3390/w13050648.

- Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A. et al. Wind waves web atlas of the Russian seas, *Water*, 15, 11(2023), 2036.
- Myslenkov S., Kruglova E., Medvedeva A. et al. Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, vol. 23, no. 3, p. ES3002.
- Nesterov E.S. Vetrovoe volnenie v Arkticheskikh morjah (obzor) [Wind waves in the arctic seas (review)], *Gidrometeorologicheskie issledovanija i prognozy*, 2020, no. 3(377), p. 19–41. (In Russian)
- Ogorodov S.A., Shabanova N.N., Kessel' A.S. et al. Izmenenie gidrometeorologicheskogo potentsiala termoabrazii beregov morej rossijskoj Arktiki [Changes of hydrometeorological potential of thermoabrasion on the russian arctic coasts], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 1, p. 26–42. (In Russian)
- Osipova E.Je., Smirnov S.V., Hairova T.A. Predposylki razvitiya jeksporta rossijskoj Arktiki, kabotazhnyh perevozok i proektnyh gruzov dlja arkticheskikh proektov [Preconditions for the development of russian arctic export, coastal (cabotage) transportation and project cargo for the arctic demand], *Arktika i Sever*, 2019, no. 37, p. 5–21. (In Russian)
- Plotnikov V.V., Vrazhkin A.N., Mezenceva L.I. et al. Izmenchivost' gidrometeorologicheskogo rezhima morej vostochnogo sektora Arktiki (Vostochno-Cibirskoe, Chukotskoe) v sovremennyj period [Variability of Hydro-meteorological regime of seas of east Arctic sector (east Siberian, Chukchi) in the modern period], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta, Inzhiniring georesursov*, 2020, vol. 331, no. 7, p. 103–115. (In Russian)
- Rules for the development and conduct of maritime operations ND no. 2-090601-010. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022, 142 p. (In Russian)
- Rostov I.D., Rostova E.V., Voroncov A.A. Tendencii klimaticheskikh izmenenij ter-micheskikh uslovij morja Laptevyyh za poslednie 37 let [Tendencies of climatic changes for thermal condition of the laptev sea in the last 37 years], *Vestnik Dal'nevostochnogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk*, 2019, no. 1, p. 97–107. (In Russian)
- Shabanov P.A. Changes in the ice-free period duration in the Kara sea coastal zone from satellite data, *Oceanology*, 2022, vol. 62, no. 4, p. 447–457.
- Shalina E.V. Izmenenie ledovitosti Severnyh morej Rossii i ocenka dostupnosti Severnogo morskogo puti po dannym sputnikovogo monitoringa [Ice Retreat in the Seas of the Russian Arctic and Increased Availability of the Northern Sea Route from Satellite Passive Microwave Observations], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 4, p. 67. (In Russian)
- Sharmar V.M. Markina Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980–2019, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2021, 21(2), 1–11, DOI: 10.2205/2020ES000741.
- Soomere T., Eelsalu M. On the wave energy potential along the eastern Baltic Sea coast, *Re-newable Energy*, 2014, 71, 221–233.
- Tojmenceva I.A., Fedorenko R.V. Perspektivy razvitiya transportno-logisticheskoy infrastruktury Severnogo Morskogo puti v ramkah programmy “odin pojas, odin put'” [Prospects for the development of the transport and logistics infrastructure of the northern sea route within the framework of the program “one belt, one road”], *Vestn. Volzhskogo un-ta im. V.N. Tatishheva*, 2023, vol. 2, no. 1(51), p. 140–149. (In Russian)
- Tret'jakov V.Ju., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Izmeneniya ledovyh uslovij plavanija po marshrutu Obskaja guba – Beringov proliv za 1998–2018 gody, *Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika*, 2019, vol. 12, no. 3, p. 65–75. (In Russian)
- Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07, Tech. Note 333, March 2019, NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019.
- Voronina S.A., Porfir'ev B. N., Semikashev V.V. et al. Posledstviya izmenenij klimata dlja jekonomicheskogo rosta i razvitiya otdel'nyh sektorov jekonomiki rossijskoj Arktiki [Climate change impact on economic growth and specific sectors' development of the Russian Arctic], *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2017, no. 4(28), p. 4–17. (In Russian)
- Vrazhkin A.N. Rezhim volnenija morej vostochnoj Arktiki v nachale XXI stoletija [The Eastern Arctic seas wave climate in the beginning of the 21st century], *Trudy DVNIGMI*, 2017, vyp. 155, p. 164–177. (In Russian)
- Waseda T., Webb A., Sato K. et al. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic Ocean, *Sci. Reports*, 2018, vol. 8, no. 4489.
- Zelenkov M.Ju. Transportno-logisticheskaja sistema Severnogo morskogo puti: perspektivy, problemy i puti ih reshenija [Transport and logistics system of the northern sea route: prospects, problems and solutions], *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2019, no. 4(36), p. 131–140. (In Russian)

Received 30.10.2023

Revised 12.11.2023

Accepted 04.12.2023