

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-579-588

CURRENT FREQUENCY VARIATION TRENDS OF DANGEROUS WINDS IN THE EASTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

S. A. Podporin¹, A. V. Kholoptsev^{1,2}

¹ — Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”,
Sevastopol, Russian Federation

² — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The article aim is to identify mean values and change trends in the frequency of winds that pose a danger to navigation on shipping routes of the Laptev and East Siberian Seas which became evident in 2010–2021 period. In the period under review the winds were considered dangerous if their average hourly speed over the water surface at 10 m altitude exceeded 15 m/s. The factual material is based on information from the ERA5 global reanalysis. The research methodology involves the use of standard methods of mathematical statistics. A comparative analysis of the last two 12-year periods (1998–2009 and 2010–2021) has shown that the climate changes that happened in 2010–2021 significantly affected the wind regime of the studied region, which had consequences for shipping. In August, a significant decrease in the frequency of dangerous winds was recorded in the region, which generally contributed to the improvement of navigation safety by reducing storm risks. Opposite trends manifested themselves from September to December, which led to increased storm surge and a rise in the likelihood of ships icing, especially on the high-latitude paths of the Northern Sea Route and approaches to the Long Strait. The decrease in the frequency of winds, revealed in January and April, contributed to the preservation of a stable ice cover and stable difficult navigation conditions in these months. The persistence of the identified trends in interannual changes in the wind regime in the region under consideration in the future is not guaranteed. Therefore, the development of the existing network of Arctic weather stations remains an urgent problem for shipping.

Keywords: Laptev Sea, East Siberian Sea, shipping, Northern Sea Route, navigational risk, wind, frequency, trend.

For citation:

Podporin, Sergey A., and Aleksandr V. Kholoptsev. “Current frequency variation trends of dangerous winds in the Eastern sector of the Russian Arctic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 579–588. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-579-588.

УДК 656.61.052: 551.583

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВТОРЯЕМОСТИ ОПАСНЫХ ВЕТРОВ В ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

С. А. Подпорин¹, А. В. Холопцев^{1,2}

¹ — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Российская Федерация

Целью статьи является выявление средних значений и тенденций изменения повторяемости ветров, представляющих опасность для судоходства в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, наблюдающихся в период 2010–2021 гг. В работе отмечается, что опасными в рассматриваемый период являлись ветры, среднечасовая скорость которых на высоте 10 м над водной поверхностью превышала 11 м/с. В качестве фактического материала использованы данные глобального реанализа ERA5. Методика проведенного исследования предполагала использование стандартных методов математической статистики. Сравнительный анализ двух последних 12-летних периодов: 1998–2009 гг. и 2010–2021 гг., показал, что произошедшие в 2010–2021 гг. климатические изменения оказали существенное влияние на ветровой режим изучаемого региона, что имело последствия для судоходства. В эти периоды

в августе в регионе зафиксировано значительное уменьшение повторяемости опасных ветров, что в целом способствовало повышению безопасности плавания за счет снижения штормовых рисков. Проявившиеся обратные тенденции с сентября по декабрь были выражены в усилении штормового волнения и повышении вероятности обледенения судов, особенно на высокоширотных трассах Северного морского пути и подходах к проливу Лонга. Снижение повторяемости ветров, выявленное в январе и апреле, способствовало сохранению устойчивого ледяного покрова и стабильно сложных условий судоходства в эти месяцы. Отмечается, что сохранение устойчивости выявленных тенденций межгодовых изменений ветрового режима в рассматриваемом регионе в будущем не гарантировано, поэтому развитие существующей в нем наблюдательной сети по-прежнему является актуальной проблемой гидрометеорологического обеспечения осуществляемого в этом районе судоходства.

Ключевые слова: море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Северный морской путь, судоходство, навигационный риск, ветер, повторяемость, тенденция.

Для цитирования:

Подпорин С. А. Современные тенденции изменения повторяемости опасных ветров в восточном секторе Российской Арктики / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 579–588. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-579-588.

Введение (Introduction)

Для морей восточного сектора Арктики в любые сезоны характерны сложные ледовые условия. Одним из основных факторов, оказывающих значительное влияние на состояние ледяного покрова и условия судоходства в этом регионе, является ветровой режим, вызывающий дрейф льда и образование полыней. В этой связи выявление современных тенденций его изменения на участках морей, по которым проходят судоходные маршруты, является актуальной проблемой гидрометеорологии, океанографии и эксплуатации арктического морского транспорта.

Наибольший интерес решение указанной проблемы представляет для участков трасс Северного морского пути (далее — СМП), на которых в современном периоде ледовые условия в любые месяцы характеризуются повышенной сложностью, а гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение судоходства является недостаточным. Многие из таких участков расположены на акваториях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского [1]. Судоходство в этих районах ограничено в основном летне-осенним сезоном — периодом, во время которого открывается *навигационное окно* для Северного завоза, активно выполняются транзитные и научные рейсы [2]. Интерес к региону дополнительно обусловлен наличием на его шельфе перспективных нефтегазоносных районов, таких как Притаймырский, Хатангский, Усть-Оленекский, Усть-Ленский и Восточно-Сибирский [3].

В условиях наблюдающегося потепления климата Арктики [4] перспективным направлением развития арктического флота, прежде всего танкерного и СПГ, является расширение временных рамок навигационного периода [5]. Сокращение площади ледяного покрова в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском пока не столь заметно, как в Баренцевом и Карском морях [6]. Более того, в отдельных районах (в частности, в районе Новосибирских островов) в течение последнего десятилетия отмечалось даже некоторое усложнение ледовых условий [5], [7]. Тем не менее в целом в современном климатическом периоде устойчивая тенденция к сокращению ледовитости Арктики существует [8]. На ее основе в ряде работ (например, [9]) даны прогнозы открытия арктических судоходных маршрутов (включая трансполярные) уже к середине XXI в. Сокращение ледяного покрова арктических морей приводит к усилению влияния этих изменений и их ветрового режима на безопасность судоходства.

В месяцы с июля по октябрь, когда в сезонных изменениях площади чистой воды в морях восточной Арктики наблюдается максимум, следствием увеличения повторяемости сильных ветров является усиление поверхностного волнения и прибоя, разрушающего берега и портовые сооружения. В остальные месяцы, когда на акваториях присутствует устойчивый ледяной покров, ветровой режим может менять динамику дрейфа льда, приводить к его сжатию и торошению, способствовать образованию полыней или, наоборот, их закрытию.

Особенности ветрового режима морей Лаптевых и Восточно-Сибирского описаны в лоциях и специализированных справочниках [10], [11], которые, однако, не отражают в полной мере динамику происходящих в настоящее время климатических изменений. Некоторые закономерности изменения ветрового режима этих морей рассмотрены в работах [12]–[14]. В работе [15] описаны тенденции изменения повторяемости ветров на трассах прибрежного маршрута СМП. Представлены результаты для ветров северных румбов для летне-осеннего навигационного периода (июль–октябрь), выявлены потенциально опасные для судоходства районы, расположенные в основном в Баренцевом, Карском и Чукотском морях. На прибрежных трассах СМП в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, напротив, опасных тенденций не выявлено. Особенности произошедших в период 2010–2019 гг. изменений атмосферной циркуляции в летние сезоны в рассматриваемом регионе описаны также в работе [16]. Тем не менее современный ветровой режим для остальных месяцев и районов морей Восточного сектора арктического шельфа и его влияние на судоходство остаются недостаточно изученными.

Целью настоящей работы является оценка современных значений средней повторяемости опасных ветров на судоходных трассах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, а также выявление статистически значимых тенденций изменений этого показателя, проявившихся за последние 12 лет.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- оценка и сравнительный анализ среднемесячных значений средней повторяемости опасных ветров в указанных морях за два последних 12-летних периода: 1998–2009 и 2010–2021 гг.
- выявление участков акваторий, на которых в последнем 12-летнем периоде присутствуют значимые тенденции к изменению данного показателя.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Опасными считаются ветры со средней скоростью более 11 м/с (6 баллов по шкале Бофорта или «сильный» ветер). При таком ветре на чистой воде средняя высота волн составляет не менее 3 м, максимальная — не менее 4,5 м¹. При наличии ледяного покрова такие ветры способны вызывать значительный дрейф льда и активизировать связанные с этим опасные природные явления. В качестве характеристики повторяемости опасного ветра (далее — ПОВ) в конкретном месяце принято количество относящихся к нему часов, в течение которых среднечасовая скорость ветра составляла не менее 11 м/с.

При решении первой задачи для всех месяцев и участков акваторий морей Лаптевых и Восточно-Сибирского определялись среднемесячные значения ПОВ, которые впоследствии усреднялись за периоды 1998–2009 и 2010–2021 гг. В рамках решения второй задачи были выявлены участки морей, на которых тенденции межгодовых изменений ПОВ в периоде 2010–2021 гг. принимались статистически значимыми с вероятностью не ниже 0,9.

В качестве характеристики тенденции рассматривалось значение углового коэффициента линейного тренда (далее — УКЛТ) соответствующего временного ряда. При оценке вероятности того, что тенденция межгодовых изменений ПОВ, выявленная для некоторого участка и месяца, является значимой, предполагалось, что последние могут быть описаны математической моделью:

$$Y_k = AT_k + G_k + C, \quad (1)$$

где A — оценка по методу наименьших квадратов значения УКЛТ процесса Y_k (k — номер члена отрезка временного ряда Y , учитываемого при вычислении A ; $k = 1, 2, \dots, k_{\max}$);

T_k — продолжительность интервала времени, отделяющего от начала изучаемого отрезка член временного ряда с номером k (при $k = 1$ $T_k = 0$);

G_k — выборочное значение из реализации нормального случайного процесса с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением S , соответствующее некоторому k ;

C — постоянная составляющая (действительная константа).

¹ Шкала Бофорта — сила ветра и состояние моря. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.vodkomotornik.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=15&Itemid=15 (дата обращения: 01.02.2023).

Решение о значимости A с вероятностью 0,9 принималось в случае, если выполнялось условие

$$|AT_k| > 1,3S, \quad (2)$$

где $|AT_k|$ — абсолютная величина.

При оценке тенденций изменений ПОВ в 2010–2021 гг. k_{\max} принималось равным двенадцати. В качестве фактического материала использована информация о распределении среднечасовых значений меридиональной и зональной составляющих скорости ветра в изучаемом регионе, представленная в базе данных реанализа ERA5, поддерживаемого европейской службой Copernicus Marine Service¹. Реанализ ERA5 основан на усовершенствованных климатических моделях [17], разработанных для условий ограниченности данных физических измерений. Содержащиеся в нем данные применялись для вычисления значений модуля среднечасовой скорости ветра на высоте 10 м над земной поверхностью. На основе результатов этих вычислений были сформированы временные ряды, члены которых представляли собой значения модуля среднечасовой скорости ветра для каждого часа за периоды 00.01.1998–23.31.2009 и 00.01.2010–23.31.2021 для всех узлов координатной сетки с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Полученные результаты для наглядности наносились на контурную карту региона.

Результаты исследования и их анализ (Research Results And Analysis)

Средние значения ПОВ в изучаемом регионе, определенные за каждый месяц периодов 1998–2009 гг. и 2010–2021 гг. в рамках решения первой задачи, представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

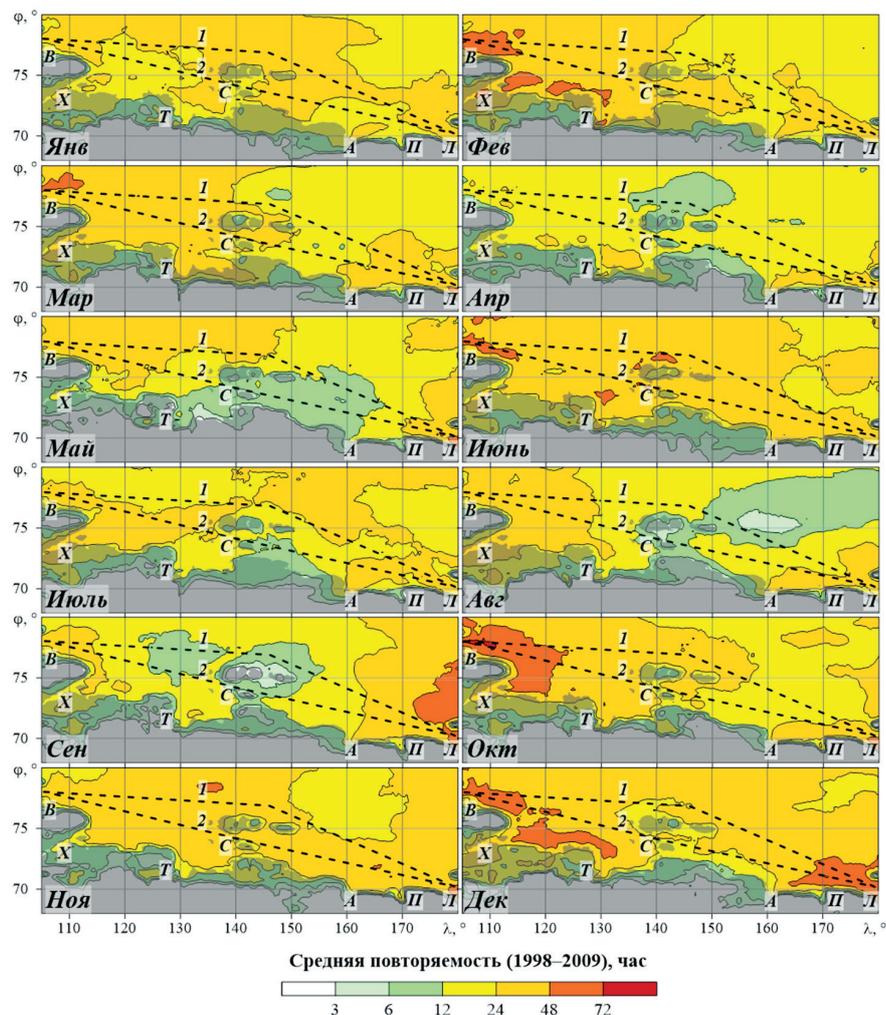


Рис. 1. Распределение средних значений ПОВ в периоде 1998–2009 гг.

¹ База данных реанализа ERA5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form> (дата обращения: 01.02.2023).

Штриховыми линиями на картах схематично обозначены высокоширотный 1 и низкоширотный 2 транзитные маршруты СМП. Маршрут 1 огибает архипелаг Новосибирские острова с севера, маршрут 2 проходит через пролив Санникова. Также для удобства ориентировки заглавными буквами обозначены важные для каботажных перевозок и Северного завоза районы изучаемого региона: В — пролив Вилькицкого; Х — Хатангский залив; Т — подходы к порту Тикси; А — бухта Амбарчик (устье реки Колымы); П — подходы к порту Певек; Л — пролив Лонга.

Как видно из рис. 1, среднемесячная ПОВ в изучаемом регионе в 1998–2009 гг. в основном не выходила за пределы 48 ч. Исключение составляли некоторые западные районы моря Лаптевых (В, Х, Т) в феврале, октябре, декабре и частично июне, где ПОВ была более 48 ч, но не превышала 72 ч. В восточной части Восточно-Сибирского моря и на подходах к проливу Лонга (районы П и Л) в сентябре и декабре также были выявлены повышенные ПОВ (48–72 ч). Наиболее «спокойными» месяцами были апрель, май, август и сентябрь. В целом средняя ПОВ в море Лаптевых была несколько выше, чем в Восточно-Сибирском. Полученные данные достаточно хорошо согласуются с описанием ветрового режима морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, представленным в [10], [11].

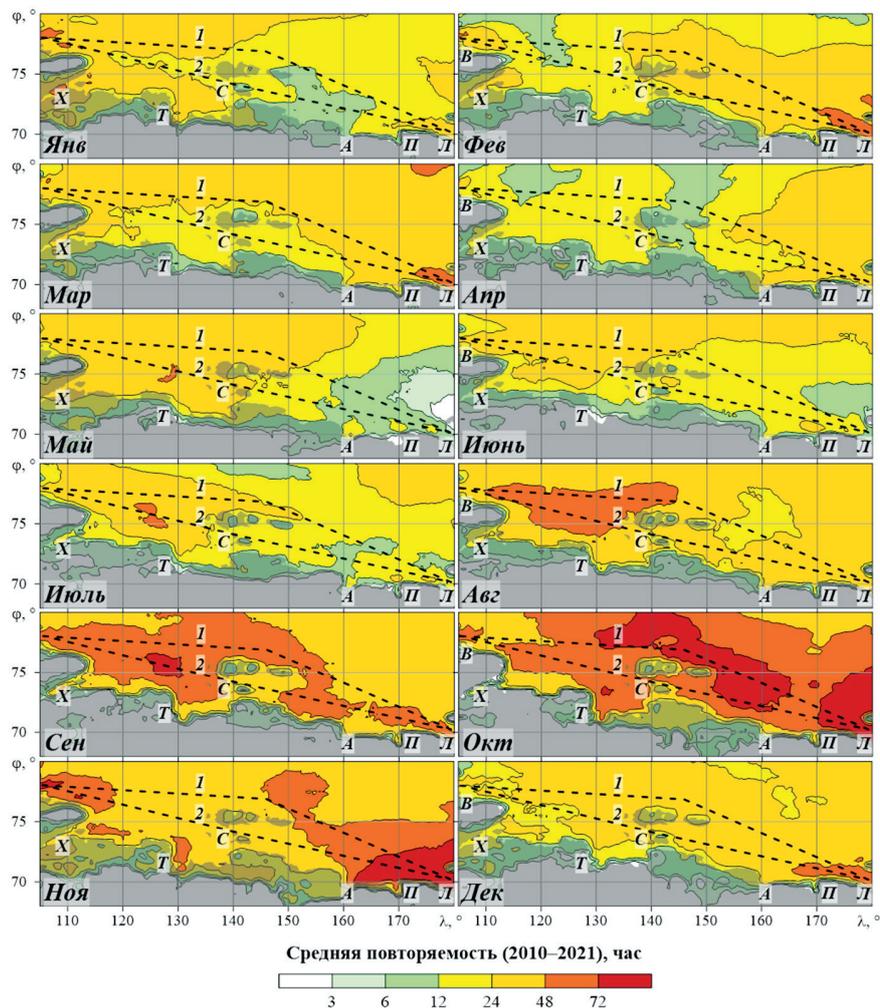


Рис. 2. Распределение средних значений повторяемости опасных ветров в период 2010–2021 гг.

За период 2010–2021 гг., как следует из рис. 2, ветровые режимы изучаемых морей претерпели изменения. Опасные ветры стали наблюдаться чаще в осенние месяцы. Ветровая обстановка ухудшилась в период активной навигации, когда ледовитость морей является минимальной (сентябрь, октябрь). Появились участки с ПОВ, превышающей 72 ч. Наибольшее их количество выявлено в октябре на высокоширотном маршруте СМП к северу, западу и востоку от архипелага Новосибирские

острова, а также в восточной части Восточно-Сибирского моря, так как в этом месяце происходит переход температур в зону отрицательных значений, и, следовательно, возрастают навигационные риски, связанные как с усиливающимся волнением, так и с обледенением судов.

Ситуация заметно усложнилась также в ноябре в восточной части Восточно-Сибирского моря и особенно на подходах к проливу Лонга. В этом месяце происходит активное ледообразование, неустойчивые скопления дрейфующего молодого льда под действием сильного ветра могут выноситься непосредственно на маршруты движения судов, создавая препятствия судоходству. В остальные месяцы средняя ПОВ в 2010–2021 гг., по сравнению с 1998–2009 гг., либо изменилась незначительно, либо несколько уменьшилась (январь, май).

В результате решения второй задачи была выполнена оценка статистически значимых (с вероятностью не менее 0,9) тенденций изменения ПОВ, проявившихся в 2010–2021 гг. Полученные результаты представлены на рис. 3 в виде карт распределения значений УКЛТ межгодовых изменений ПОВ в акватории изучаемого региона.

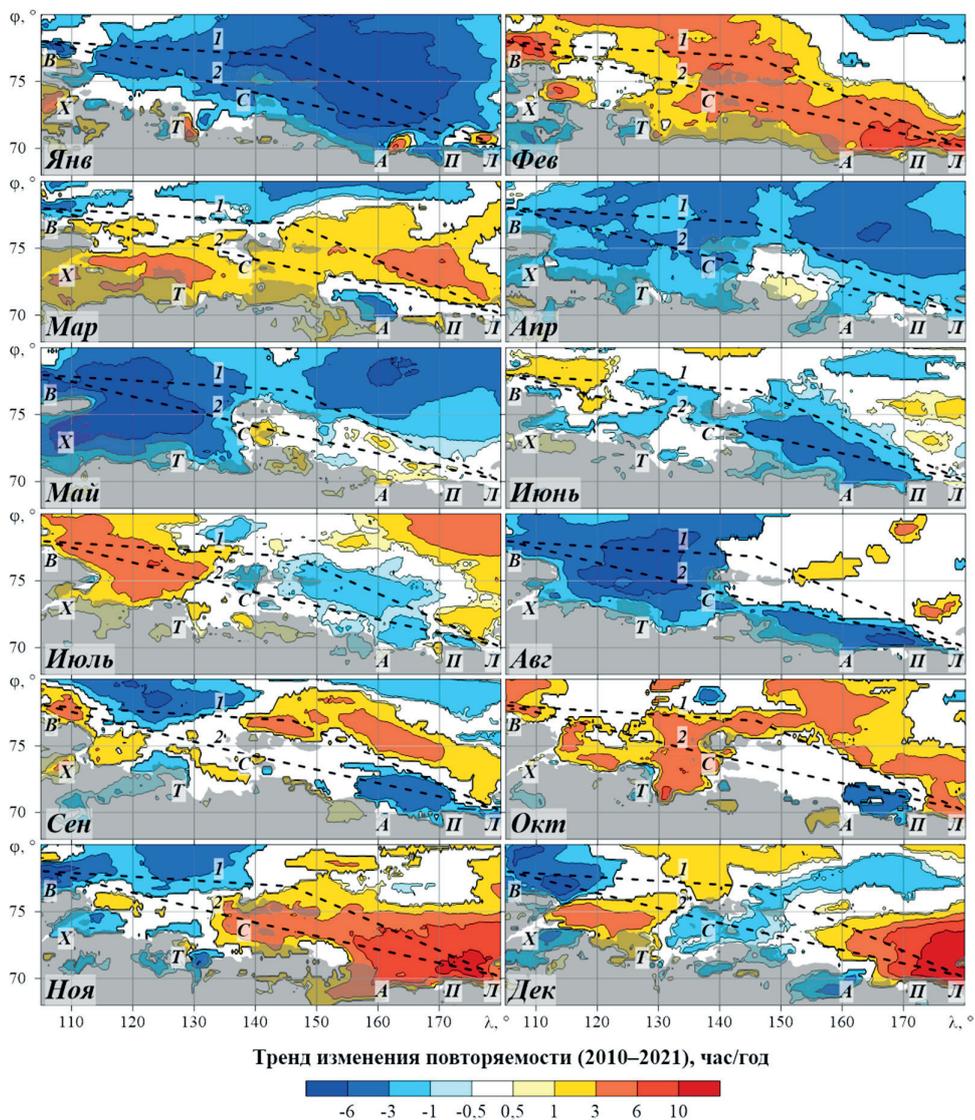


Рис. 3. Тенденции изменения ПОВ в море Лаптевых и Восточносибирском море в период 2010–2021 гг.

Как видно из рис. 3, происходящие в различные месяцы изменения ПОВ во многих районах изучаемых морей являются разнонаправленными. В январе проявляется ярко выраженный тренд к снижению этого показателя во всем изучаемом регионе. В феврале, напротив, в большинстве рай-

онов имеет место возрастающий тренд (значения более 6 ч/год выявлены в районах В, Х, С, А, П, Л). В марте возрастающий тренд сохраняется, хотя он менее выраженный. Сильнее всего он проявился в районах Х, Т, П, Л. В северных районах изучаемых морей при этом ПОВ убывает. В апреле и мае, как и в январе, проявляется ярко выраженный тренд к снижению ПОВ во всем изучаемом регионе.

В июне повторяемость опасных ветров снижается в юго-западной части Восточно-Сибирского моря (районы С, А, П) и локально в море Лаптевых (центральная часть, а также районы Х и Т). К северо-востоку от полуострова Таймыр при этом выявлен небольшой возрастающий тренд. В июле в море Лаптевых (за исключением восточной части) ПОВ заметно возрастает, а в Восточно-Сибирском в центральной и прибрежной его частях убывает, увеличиваясь при этом на севере и незначительно на востоке. В августе во всем море Лаптевых и прибрежной части Восточно-Сибирского выявлены явные тренды на убывание этого показателя.

Сентябрь характеризуется разнонаправленными трендами в разных районах изучаемых морей: убывающий тренд зафиксирован в районах Т, А, П; возрастающий — к северу от Новосибирских островов, в центральной части Восточно-Сибирского моря, а также районах В и Х. В октябре проявляются преимущественно возрастающие тренды ПОВ в большинстве районов изучаемого региона. Наиболее ярко они выражены к западу и северу от Новосибирских островов, северной части Восточно-Сибирского моря, а также районах В, Х, Т, С, Л. Убывающий тренд проявился локально в районах А и П. В ноябре в большинстве районов моря Лаптевых в межгодовых изменениях ПОВ проявляется значимая тенденция к снижению, наиболее заметная в проливе Вилькицкого (район В), а также северной части моря. В Восточно-Сибирского моря, напротив, имеет место противоположная тенденция, особо выраженная на подходах к проливу Лонга, а также в центральной части моря. В декабре значительный возрастающий тренд сохранился и даже несколько усилился в восточной части Восточно-Сибирского моря, а также юго-западной и центральной частях моря Лаптевых. Ярко выраженный тренд на уменьшение ПОВ проявился в северо-западной части моря Лаптевых, в районе С и северной части Восточно-Сибирского моря.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение ПОВ, зафиксированное в сентябре и октябре, в целом осложняет условия судоходства в регионе. Поскольку в эти месяцы преобладают ветры северных румбов, такой процесс повышает вероятность выноса дрейфующих льдов из северных районов моря на судоходные трассы. Поскольку стационарный ледяной покров в эти месяцы отсутствует, то возрастают также риски возникновения штормов и обледенения судов. При этом наибольшим рискам подвержены участки высокоширотного маршрута СМП в северной и центральной частях Восточно-Сибирского моря.

Тенденция к уменьшению ПОВ, выявленная в августе в большинстве районов моря Лаптевых и на прибрежных участках Восточно-Сибирского, напротив, свидетельствует о повышении безопасности навигации и увеличении допустимой скорости движения судов на прибрежном маршруте СМП (на участках, где глубины для крупнотоннажных судов достаточно велики).

Выявленное в январе и апреле уменьшение ПОВ способствует сохранению устойчивого ледяного покрова и стабильно сложных условий судоходства. Поскольку в эти месяцы в изучаемом регионе преобладают ветры южных румбов, способные отжимать дрейфующий лед от припая, можно предположить, что в 2010–2021 гг. значимого увеличения площадей заприпайных полыней, которое имело место в 1993–2009 гг. [18], не происходило.

Увеличение ПОВ в феврале и марте, выявленное в 2010–2021 гг., благоприятствует увеличению здесь размеров заприпайных полыней. Это позволяет допускать возможность прокладки по некоторым из них маршрутов судов с высоким арктическим ледовым классом (типа «Ямалмакс» и аналогичных) [19].

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Полученные результаты в полной мере соответствуют существующим представлениям о переменах ветрового режима арктических морей, которые произошли в период современного потепления климата [12]–[14]. Наряду с другими морями такие перемены заметно проявились в морях Лаптевых

и Восточно-Сибирском. Новыми фактами, установленными в настоящей работе, являются оценки средних значений ПОВ и тенденции их изменения для различных месяцев и участков трасс СМП, соответствующие периоду 2010–2021 гг. Полученные результаты подтверждают справедливость представлений о том, что в месяцы активного ледообразования (ноябрь и декабрь), когда ледяной покров неустойчив и представлен в основном молодым льдом, навигация судов с высоким ледовым классом в восточном секторе СМП возможна. Она может быть также сравнительно безопасной, если выявленные тенденции к увеличению ПОВ в эти месяцы сохранятся и в будущем.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Происходящие климатические изменения оказывают существенное влияние на ветровой режим морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, а также условия судоходства в них. Темпы этих изменений в 2010–2021 гг. повысились.

2. Тенденции к улучшению условий судоходства отмечаются в августе, феврале и марте. Уменьшение повторяемости опасных ветров в августе приводит к снижению штормовых рисков. Увеличение этого показателя, выявленное в феврале и марте, способствует увеличению размеров заприпайных полыней.

3. Тенденции к ухудшению условий судоходства проявились с сентября по декабрь. Значимое увеличение ПОВ, выявленное в эти месяцы, повышает штормовые риски и опасность обледенения, особенно на высокоширотной трассе Северного морского пути и подходах к проливу Лонга. Выявленное в январе и апреле значимое снижение ПОВ над многими частями акватории изучаемого региона способствует сохранению в них устойчивого ледяного покрова и стабильно сложных условий судоходства.

4. Сохранение устойчивости выявленных тенденций межгодовых изменений ветрового режима в рассматриваемом регионе в будущем не гарантировано, поэтому развитие существующей в нем наблюдательной сети остается актуальной проблемой гидрометеорологического обеспечения осуществляемого здесь судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.

2. Тезиков А. Л. Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.

3. Григорьев Г. А. Перспективы освоения углеводородных ресурсов российского арктического шельфа — стратегическая пауза неизбежна / Г. А. Григорьев // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2019. — № 2 (165). — С. 37–45.

4. Моря Российской Арктики в современных климатических условиях / под ред. И. М. Ашика. — СПб.: Изд. ААНИИ, 2021. — 360 с.

5. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.

6. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России / И. О. Думанская. — М.: Обнинск: ИГ – СОЦИН, 2017. — 640 с.

7. Холопцев А. В. Анализ изменений ледовых условий на Северном морском пути в конце XX — начале XXI века / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.

8. *Yadav J.* Dramatic decline of Arctic sea ice linked to global warming / J. Yadav, A. Kumar, R. Mohan // *Natural Hazards*. — 2020. — Vol. 103. — Pp. 2617–2621. DOI: 10.1007/s11069-020-04064-y
9. *Aksenov Y.* On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice / Y. Aksenov, E. E. Popova, A. Yool, A. G. Nurser, T. D. Williams, L. Bertino, J. Bergh // *Marine Policy*. — 2017. — Vol. 75. — Pp. 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
10. Pub. 183 (Enroute). *Sailing Directions. North Coast of Russia*. — Springfield, Virginia: National Geospatial-Intelligence Agency, 2021. — 188 p.
11. *Зонн И. С.* Восточно-Сибирское море: энциклопедия / И. С. Зонн, А. Г. Костяной, А. В. Семенов; под ред. акад. РАН Г. Г. Матишова. — М.: Междунар. отношения, 2014. — 173 с.
12. *Алексеев Г. В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике / Г. В. Алексеев // *Фундаментальная и прикладная климатология*. — 2015. — Т. 1. — С. 11–26.
13. *Катцов В. М.* Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики / В. М. Катцов, Б. Н. Порфирьев // *Арктика: экология и экономика*. — 2012. — № 2 (6). — С. 066–079.
14. *Мохов И. И.* Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий / И. И. Мохов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2020. — Т. 66. — С. 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
15. *Холопцев А. В.* Участки Северного морского пути с наибольшей повторяемостью ветров северных румбов в XXI веке / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 305–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-305-314.
16. *Kholoptsev A. V.* Meridional components of atmospheric circulation and Arctic ice cover in summer / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2021. — No. 6. — Pp. 372–378. DOI: 10.3103/S1068373921060030.
17. *Hoffmann L.* From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF’s next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations / L. Hoffmann, G. Günther, D. Li, O. Stein, X. Wu, S. Griessbach, Y. Heng, P. Konopka, R. Müller, B. Vogel, J. S. Wright // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2019. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 3097–3124. DOI: 10.5194/acp-19-3097-2019.
18. *Карелин И. Д.* Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX — начале XXI века / И. Д. Карелин, В. П. Карклин. — СПб.: ААНИИ, 2012. — 180 с.
19. *Исаулова К. Я.* Исследование навигационно-гидрографических характеристик заприпайных полыней восточного сектора Северного морского пути / К. Я. Исаулова // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.

REFERENCES

1. Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. “The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
2. Tezиков, Aleksandr L., and Evgeniy O. Ol’khovik. “Studying the factors affecting the duration of navigation in the Northern Sea Route water area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.
3. Grigoriev, G. A. “Prospects for the development of hydrocarbon resources of the Russian Arctic shelf — a strategic pause is inevitable.” *Mineral’nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* 2(165) (2019): 37–45.
4. Ashik I. M., ed. *Morya Rossiyskoy Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh*. SPb.: ААНИИ, 2021.
5. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Prospects for unescorted navigation of arc7 ice-class vessels in the region of the new Siberian islands during the winter period.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
6. Dumanskaya, I. O. *Ledovye usloviya morei aziatskoi chasti Rossii*. M.: Obninsk: IG – SOTSIN, 2017.
7. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Analysis of ice situation changes on the Northern Sea Route in the late XX — early XXI century.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.
8. Yadav, Juhi, Avinash Kumar, and Rahul Mohan. “Dramatic decline of Arctic sea ice linked to global warming.” *Natural Hazards* 103 (2020): 2617–2621. DOI: 10.1007/s11069-020-04064-y.

9. Aksenov, Yevgeny, E. E. Popova, A. Yool. A. J. G. Nurser, Timothy D. Williams, Laurent Bertino, and Jon Berg. "On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice." *Marine Policy* 75 (2017): 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
10. *Pub. 183 (Enroute). Sailing Directions. North Coast of Russia*. Springfield, Virginia: National Geospatial-Intelligence Agency, 2021.
11. Zonn, I. S., A. G. Kostyanov, and A. V. Semenov. *Vostochno-Sibirskoe more: entsiklopediya*. Edited by G. G. Matishov. M.: Mezhdunar. otnosheniya, 2014.
12. Alekseev, G. V. "Development and amplification of global warming in the Arctic." *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* 1 (2015): 11–26.
13. Kattsov, Vladimir M., and Boris N. Porfir'yev "Climate change in the Arctic: consequences for the environment and the economy." *Arctic: ecology and economy* 2(6) (2012): 066–079.
14. Mokhov, Igor I. "Features of modern climate change in the Arctic and their consequences." *Arctic and Antarctic Research* 66 (2020): 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
15. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Areas of the Northern Sea Route with the highest frequency of the northern winds in the XXI century." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 305–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-305-314.
16. Kholoptsev, A. V., and S. A. Podporin. "Meridional components of atmospheric circulation and Arctic ice cover in summer." *Russian Meteorology and Hydrology* 46 (2021): 372–378. DOI: 10.3103/S1068373921060030.
17. Hoffmann, Lars, Gebhard Günther, Dan Li, Olaf Stein, Xue Wu, Sabine Griessbach, Yi Heng, Paul Konopka, Rolf Müller, Bärbel Vogel, and Jonathon S. Wright. "From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations." *Atmospheric Chemistry and Physics* 19.5 (2019): 3097–3124. DOI: 10.5194/acp-19-3097-2019.
18. Karelin, I. D., and V. P. Karklin. *Pripay i zapripaynyye polyn'i arkticheskikh morey sibirskogo shel'fa v kontse XX — nachale XXI veka*. SPb.: AANII, 2012.
19. Isaulova, Kristina Ya. "Research of navigational and hydrographic characteristics of flaw polynyas of the eastern sector of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
Севастопольское отделение
ФГБУ «Государственный океанографический
институт имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор
Севастопольское отделение
ФГБУ «Государственный океанографический
институт имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: kholoptsev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
Sevastopol branch
of FSBI "N. N. Zubov's State
Oceanographic Institute"
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor
Sevastopol branch
of FSBI "N. N. Zubov's State
Oceanographic Institute"
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 апреля 2023 г.
Received: April 19, 2023.