

КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

УДК 551.467

DOI: 10.15372/KZ20210503

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МАКСИМАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ПРИПАЙНОГО ЛЬДА В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ

В.В. Селюженок

*Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет,
119034, Москва, Кропоткинский пер., 6, Россия; v1selyuzhenok@oceanography.ru*

Приведены данные о максимальной площади припайного льда в Восточно-Сибирском море и ее межгодовой изменчивости по данным ледовых карт ААНИИ за период 1999–2019 гг. Максимальная площадь припая сопоставлялась с ветровым режимом в акватории Восточно-Сибирского моря по данным реанализа ERA5. Анализ межгодовой изменчивости максимальной площади припайного льда показал отсутствие статистически значимых изменений в 1999–2019 гг. Выделено два типичных положения кромки припая, характерных для месяцев с максимально развитой площадью припая. В одни сезоны развитие припая останавливается при достижении кромкой изобаты 20 м, в другие сезоны кромка продвигается до изобаты 30 м. Наибольшего развития припайный лед достигает при преобладающих северных и северо-восточных нажимных ветрах, которые способствуют деформации льда и образованию стамух у мористой кромки припая.

Ключевые слова: припайный лед, морской лед, стамухи.

INTERANNUAL VARIATIONS OF MAXIMAL FAST ICE EXTENT IN THE EAST SIBERIAN SEA

V. V. Selyuzhenok

*Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet,
Kropotkinskij per. 6, Moscow, 119034, Russia; v1selyuzhenok@oceanography.ru*

The paper presents the data on maximal extent of the East Siberian fast ice and its variability based on Arctic and Antarctic Research Institute operational sea ice chart for the period from 1999 to 2019. The maximal fast ice extent were compared to the ERA5 reanalysis local winds. The analysis of the maximal landfast ice variability showed no statistically significant changes between 1999 and 2019. Two typical configurations of fast ice edge were revealed for the winter month characterized by the maximal fast ice extent. In some seasons fast ice development stops once the edges reaches 20 m depth, while in other season the fast ice edges advances to 30 m depth. The maximal fast ice extent is reached during the seasons with prevailing northerly and north-easterly winds. The onshore wind favours sea ice deformation and grounding at the seaward fast ice edge.

Key words: landfast sea ice, sea ice, stamukhi.

ВВЕДЕНИЕ

Восточно-Сибирское море находится в зоне соприкосновения атмосферного воздействия Атлантического и Тихого океанов и характеризуется наиболее коротким летним сезоном и холодным зимним периодом среди морей российского сектора Арктики. Зимой основное влияние на ветровой режим Восточно-Сибирского моря оказывает Сибирский антициклон, слабее выражено влияние Полярного антициклона. В связи с этим над морем преобладают юго-западные и южные ветры со скоростью 6–7 м/с. Атлантические циклоны, преобладающие в западной части моря, и Тихоокеанские циклоны, преобладающие в юго-восточной части моря, обуславливают усиление ветра северного и северо-восточного направлений [Добровольский, Залогин, 1982]. Под действием северных

и северо-восточных сильных ветров в акватории формируется торосистый ледяной покров. Нарастание ледяного покрова происходит в течение всего зимнего периода и заканчивается в конце мая [Юлин и др., 2018]. Западная часть Восточно-Сибирского моря характеризуется наличием благоприятных факторов для формирования припая: изрезанная береговая линия и наличие островов, отсутствие сильных приливных течений, а также наличие мелководий, позволяющих формироваться стамухам [Зубов, 1945]. Площадь припайного льда вокруг Новосибирских островов в период его максимального развития составляет больше половины суммарной площади припая всех арктических морей [Карклин и др., 2013]. Основными факторами, ограничивающим максимальное развитие

припая, являются глубины и рельеф дна. Мористая кромка припая, как правило, повторяет контуры изобат 20–25 м [Гудкович, 1974; Mahoney et al., 2014]. Наиболее детальные характеристики режима припайного льда в Восточно-Сибирском море за период с 1980 по 2005 г. представлены в работе [Карклин, Карелин, 2009].

В настоящее время ввиду наблюдаемых климатических изменений и развивающейся хозяйственной деятельности в Арктике ведется активное изучение состояния ледяного покрова. В прибрежно-шельфовой зоне выявлены изменения режима припайного льда. На основе карт ледовой обстановки Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) и Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) была дана оценка трендов продолжительности сезона существования припайного льда [Divine et al., 2004; Yu et al., 2014; Selyuzhenok et al., 2015]. Согласно данным NOAA, отрицательный тренд характерен для площади припая во всех морях Российской Арктики, а общая площадь припайных льдов в Северном полушарии с 1970 по 2012 г. уменьшалась со скоростью $-12.27 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ ($7 \pm 1.5 \%$) за десятилетие [Yu et al., 2014].

Целью данной работы является оценка межгодовой изменчивости максимальной площади припайного льда в Восточно-Сибирском море с 1999 по 2019 г.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Данные о площади и положении границ припайного льда в Восточно-Сибирском море были получены из региональных ледовых карт Северного Ледовитого океана ААНИИ за период 1999–2019 гг., доступных в цифровом формате SIGRID-3 (<http://wdc.aari.ru/>). С 1998 г. основой для составления таких ледовых карт стали данные спутниковых наблюдений. Региональные ледовые карты составляются экспертами в масштабе 1:500 000 и издаются еженедельно. Таким образом, последовательность ледовых карт позволяет создать наиболее точный однородный ряд регулярных наблюдений за состоянием припайного льда.

На рис. 1 показаны средние сезонные изменения площади припайного льда в Восточно-Сибирском море. В качестве максимальной площади припая использовалось среднее значение площади припая в феврале–мае. С октября по май площадь припая нарастает, а с июня начинается ее уменьшение (см. рис. 1). В связи с отсутствием в базе данных ледовых карт за зимний период 2002–2003 гг. для акватории Восточно-Сибирского моря этот период был исключен из дальнейшего анализа.

Для анализа направления и скорости ветра использовались данные модели реанализа ERA5

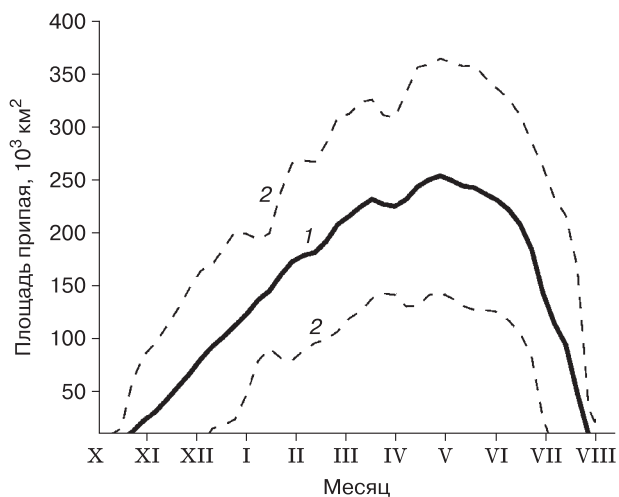


Рис. 1. Средние сезонные изменения площади припая в Восточно-Сибирском море за период 1999–2016 гг.

1 – среднее значение; 2 – два стандартных отклонения от среднего значения.

[Hersbach et al., 2020], которая с высокой точностью воспроизводит скорость и направление в сравнении с другими моделями (ERA-Interim, Japanese 55-year Reanalysis, Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications-2, National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research Reanalysis 1) [Ramon et al., 2019]. Средние суточные значения скорости и направления ветра над акваторией моря были получены путем осреднения меридиональных и зональных компонентов скорости ветра на высоте 10 м, предоставляемых реанализом с дискретностью 1 ч. Из суточных значений компонент были получены скорость и направление ветра для акватории Восточно-Сибирского моря. Далее были рассчитаны повторяемость ветра по восьми направлениям (румбам) и количеству штилей (количество дней со средней скоростью ветра менее 0.5 м/с) с начала ноября до конца мая, что охватывает период с начала формирования припая до начала его разрушения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показана межгодовая изменчивость максимальной площади припая (февраль–май) за период 1999–2019 гг. Межгодовые колебания площади припая в среднем составляют 15 %, но в некоторые годы могут превышать 30 % от многолетнего среднего значения. С 2007 по 2012 г. средняя площадь припая имела минимальные значения. Этот период совпадает с сезонами рекордно низкой ледовитости в летний сезон в восточной Арктике. В 2007 г. наблюдалось максимальное отступление кромки ледяного покрова в летние месяцы

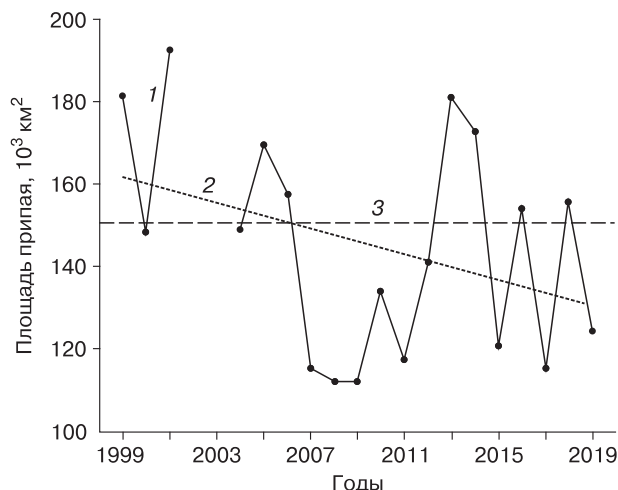


Рис. 2. Изменение максимальной площади припая в Восточно-Сибирском море за 1999–2019 гг.

1 – среднее значение площади припая в феврале–мае; 2 – линейный тренд; 3 – среднемноголетнее значение площади в феврале–мае (1999–2019 гг.).

в Восточно-Сибирском море [Егоров, 2020]. Линейный тренд изменения максимальной площади припая для этого периода составляет $-1.6 \cdot 10^3 \text{ km}^2$, однако он не является статистически значимым (p -уровень значимости $< 90\%$).

В годы с отрицательной аномалией площади припайного льда в феврале–мае характерно поло-

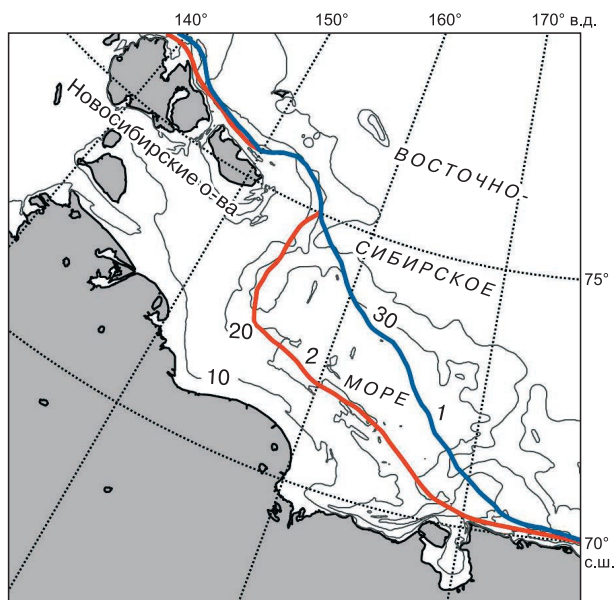


Рис. 3. Среднее положение кромки припая в феврале–мае:

1 – при площади припая, превышающей среднемноголетнее значение; 2 – при площади припая, не достигающей среднемноголетнего значения.

жение кромки припая, практически повторяющее контур изобаты 20 м (рис. 3). При положительных аномалиях площади в центральной части моря кромка припая смещается на север и приближается к изобате 30 м. Основные различия в среднем положении кромки наблюдаются между 155 и 170 меридианами восточной долготы.

Анализ повторяемости приземного ветра показывает, что для зим с положительной аномалией площади припая характерны нажимные ветры северного и северо-восточного направлений (см. таблицу). Суммарная повторяемость ветров данных направлений в сезоны с отрицательной аномалией площади припая в 2 раза ниже, наиболее частыми являются южные ветры, которые являются отжимными. Количество штилей для зим как с положительными, так и с отрицательными аномалиями площади припая составляет менее 15 дней за период с ноября по май (менее 9%).

На основе межгодовых изменений площади припая и соответствующих преобладаний повторяемости нажимных и отжимных ветров можно говорить о достаточно тесной связи между этими двумя процессами. Роль нажимных ветров в сезонном становлении припайного льда впервые описана в работе [Зубов, 1945]. Понятен механизм взаимодействия между рассмотренными параметрами: под влиянием нажимных ветров массивы дрейфующих льдов смещаются к границе припая. В результате сильных сжатий происходит их примерзание к ранее образовавшемуся припаю. Такой механизм скачкообразного увеличения площади припая в соседнем с Восточно-Сибирским морем Лаптевых описан в современных работах (например, [Карклин и др., 2013]). При смене режима преобладающего направления ветра с нажимного на отжимный припай удерживается на месте. Кромка припая в период его максимального развития в восточной части моря Лаптевых каждый год занимает одно положение, повторяющее контур изобат 20–25 м, а межгодовые колебания максимальной площади припая в море не превышают 15% [Selyuzhenok et al., 2015]. Согласно [Гудкович, 1974], на глубинах более 20–25 м припай, толщина которого вдоль кромки, как правило, не превышает 1.5–2.0 м [Карклин и др., 2013], не может проти-

Повторяемость направлений ветра и количество штилей

Годы с аномалией площади припая	Повторяемость направлений ветра, %							Кол-во штилей	
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З		СЗ
Положительной	18.8	26.2	12.1	9.2	6.2	6.0	10.0	11.5	4
Отрицательной	14.9	7.0	10.7	10.7	20.3	13.3	10.1	13.0	11

востоять совместному влиянию тангенциальных сил ветра и приливно-отливных явлений. Другой возможной причиной, ограничивающей распространение припая, может быть отсутствие стамух, являющихся дополнительными точками опоры для припая на глубинах более 25 м [Горбунов и др., 2008]. В Восточно-Сибирском море распространение припая до изобаты 30 м (положение кромки 1 на рис. 3) возможно только в сезоны с преобладанием нажимных ветров. Вероятно, при преобладании ветров отжимных направлений в Восточно-Сибирском море не образуется достаточного количества стамух на глубинах распространения мористой кромки припая, способных удерживать припай значительной площади на месте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Восточно-Сибирском море наблюдается значительная многолетняя изменчивость площади припайного льда. Межгодовые колебания площади припая в среднем составляют 15 %, но в некоторые годы могут превышать 30 % от многолетнего среднего значения. В зависимости от преобладающих направлений ветров кромка припая в период максимального развития занимает одно из двух характерных положений: 1) мористая кромка припая примерно повторяет форму изобаты 20 м; 2) мористая кромка припая в центральной части акватории выдается на север и приближается к изобате 30 м. Максимального распространения припай достигает в зимы с преобладающими нажимными ветрами, способствующими торошению льда и образованию стамух. Стамухи являются дополнительными точками опоры для припая, за счет которых припай способен противостоять силам ветра и приливно-отливных явлений на глубинах более 25 м. Анализ временного ряда максимальной площади припайного льда показал отсутствие статистически значимого тренда за период 1999–2019 гг.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-35-60033).

Литература

- Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дыммент Л.Н.** Стамухи моря Лаптевых // Пробл. Арктики и Антарктики, 2008, № 2 (79), с. 111–116.
- Гудкович З.М.** Воздействие тангенциальных сил ветра и течений на припай // Тр. ААНИИ, 1974, т. 316, с. 96–106.
- Добровольский А.Д.** Моря СССР / А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин. М., Изд-во Моск. ун-та, 1982, 192 с.
- Егоров А.Г.** Пространственное положение кромки льдов в августе–сентябре в восточных морях России в начале XXI в. // Пробл. Арктики и Антарктики, 2020, т. 66, № 1, с. 38–55.
- Зубов Н.Н.** Льды Арктики. М., Изд-во Главсевморпути, 1945, 360 с.
- Карклин В.П., Карелин И.Д.** Сезонная и многолетняя изменчивость характеристик ледового режима морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 187–201.
- Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В., Усольцева А.Е.** Особенности формирования припая в море Лаптевых // Пробл. Арктики и Антарктики, 2013, № 3(97), с. 11–14.
- Юлин А.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А., Иванов В.В.** Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря // Пробл. Арктики и Антарктики, 2018, т. 64, вып. 3, с. 229–240.
- Divine D.V., Korsnes R., Makshtas A.P.** Temporal and spatial variation of shore-fast ice in the Kara Sea // Continental Shelf Res., 2004, vol. 24, No. 15, p. 1717–1736.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.** The ERA5 global reanalysis // Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 2020, No. 146, p. 1999–2049.
- Mahoney A.R., Eicken H., Gaylord A.G., Gens R.** Landfast sea ice extent in the Chukchi and Beaufort Seas: The annual cycle and decadal variability // Cold Regions Sci. and Technol., 2014, vol. 103, p. 41–56.
- Ramon J., Lledó L., Torralba V. et al.** What global reanalysis best represents near-surface winds? // Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 2019, No. 145, p. 3236–3251.
- Selyuzhenok V., Krumpfen T., Mahoney A. et al.** Seasonal and interannual variability of fast ice extent in the southeastern Laptev Sea between 1999 and 2013 // J. Geophys. Research: Oceans, 2015, vol. 120, No. 12, p. 7791–7806.
- Yu Y., Stern H., Fowler C. et al.** Interannual variability of Arctic landfast ice between 1976 and 2007 // J. Climate, 2014, vol. 27, No. 1, p. 227–243.
- URL:** <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/> (дата обращения: 05.05.2021).

References

- Gorbuнов Yu.A., Losev S.M., Dyment L.N. Stamuhkas of the Laptev Sea. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2008, No. 2 (79), p. 111–116 (in Russian).
- Gudkovich Z.M. The influence of tangential wind and wave action on fast ice. Trudy AANII [Transactions of AARI], 1974, vol. 316, p. 96–106 (in Russian).
- Dobrovolskij A.D., Zalogin B.S. Morya SSSR [Seas of the USSR]. Moscow, Izd-vo MGU, 1982, 192 p. (in Russian).
- Egorov A.G. Spatial location of ice edge in August–September in the Russia's eastern seas in early 21st century. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2020, vol. 66, No. 1, p. 38–55 (in Russian).
- Zubov N.N. L'dy Arktiki [Arctic Ice]. Moscow, Izd-vo MGU, 1945, 360 p. (in Russian).
- Karklin V.P., Karelin I.D. Seasonal and interannual variability of sea ice regime in the Laptev and East Siberian Sea. In: Sistema morja Laptevyyh i priliegajushhih morej Arktiki [System of the Laptev Sea and the Adjacent Arctic Seas: Modern and Past Environment]. Moscow, Izd-vo MGU, 2009, p. 187–201 (in Russian).
- Karklin V.P., Karelin I.D., Yulin A.V., Usoltseva A.E. Peculiarities of the landfast ice formation in the Laptev Sea. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2013, No. 3(97), p. 11–14 (in Russian).
- Yulin A.V., Sharatunova M.V., Pavlova E.A., Ivanov V.V. Seasonal and interannual changes of ice masses in East Siberian sea.

Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2018, vol. 64, No. 3, p. 229–240 (in Russian).

Divine D.V., Korsnes R., Makshtas A.P. Temporal and spatial variation of shore-fast ice in the Kara Sea. *Continental Shelf Research*, 2004, vol. 24, No. 15, p. 1717–1736.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2020, No. 146, p. 1999–2049.

Mahoney A.R., Eicken H., Gaylord A.G., Gens R. Landfast sea ice extent in the Chukchi and Beaufort Seas: The annual cycle and decadal variability. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, vol. 103, p. 41–56.

Ramon J., Lledó L., Torralba V., Soret A. et al. What global reanalysis best represents near-surface winds? *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2019, No. 145, p. 3236–3251.

Selyuzhenok V., Krumpfen T., Mahoney A., Janout M. et al. Seasonal and interannual variability of fast ice extent in the southeastern Laptev Sea between 1999 and 2013. *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, vol. 120, No. 12, p. 7791–7806.

Yu Y., Stern H., Fowler C., Fetterer F. et al. Interannual variability of Arctic landfast ice between 1976 and 2007. *J. Climate*, 2014, vol. 27, No. 1, p. 227–243.

URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/> (last visited: 05.05.2021).

*Поступила в редакцию 10 августа 2020 г.,
после доработки – 10 июня 2021 г.,
принята к публикации 15 июня 2021 г.*