

Научная статья
УДК 551.467 (268.53)
doi:10.37614/2949-1185.2024.3.3.002

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТОКА РЕКИ ЛЕНЫ НА ПЛОЩАДЬ ЛЬДА В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

Александра Сергеевна Булавина

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
bulavina@mmbi.info

Аннотация

Ледовый режим моря Лаптевых претерпел значительные изменения в последние два десятилетия, влияние речного стока на процессы формирования и разрушения морского льда возросло. С 2004 по 2022 годы колебания стока Лены прямо коррелировали со средней годовой площадью льда в море Лаптевых. Высокая водность Лены способствовала ускорению процессов ледообразования осенью и сдвигу на более поздние сроки начала таяния льда весной.

Ключевые слова:

море Лаптевых, река Лена, морской лед, речной сток

Original article

THE EFFECT OF FLUCTUATIONS OF THE LENA RIVER RUNOFF ON THE AREA OF THE LAPTEV SEA ICE COVER

Alexandra S. Bulavina

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
bulavina@mmbi.info

Abstract

The ice regime of the Laptev Sea has significant changes during the last twenty years. After the changes in the ice regime of the Laptev Sea, the influence of river runoff on the processes of seasonal formation and destruction of sea ice have increased. During the period from 2004 to 2022, the average annual ice area in the Laptev Sea has a positive correlation with a fluctuations of Lena runoff. The high-water content years of Lena has stimulated to the speedup of the ice cover formation process in autumn and the shift of the beginning of ice melting in spring to a later date.

Keywords:

Laptev Sea, Lena River, marine ice cover, river runoff

Введение

В Северный Ледовитый океан поступают теплые соленые воды из Северной Атлантики. Они циклонически перемещаются по Арктическому бассейну и проникают в моря Северного Ледовитого океана (Rudels, 2013). Одновременно с этим моря получают аномально большое количество пресной воды на единицу площади по сравнению с морями других океанов (Analysis ..., 2010; Rudels, 2013) и аномально малое количество тепловой энергии Солнца. Благодаря этому на поверхности арктических морей формируется холодный опресненный слой воды, в то время как под ним распространяются теплые и соленые атлантические воды. Возникающая в результате этих процессов устойчивая стратификация играет важную роль в процессах формирования морского льда, поскольку галоклин защищает холодный поверхностный слой от тепла, накапливаемого в слое под ним (Steele, Boyd, 1998). Пресная вода, поступающая за счет стока континентальных рек, играет большую роль в поддержании этой стратификации. Колебания стока крупнейших рек, вероятно, могут оказывать заметное влияние на процессы ледообразования.

При объеме воды в море Лаптевых около 353000 км^3 , реки ежегодно приносят в него 730 км^3 пресной воды. Крупнейшая река, впадающая в море Лаптевых, – Лена. Сток Лены формирует область опреснения площадью $300000\text{--}500000 \text{ км}^2$ (Осадчиев, 2021). Таким образом, сток Лены в значительной степени влияет на гидрологическую структуру вод и может оказать существенное влияние на ледовые процессы в море Лаптевых.

Для установления роли различных факторов в процессе ледообразования используют моделирование процессов, происходящих непосредственно в море (Consequences ..., 2016). Влияние речного стока в таких моделях рассматривается исходя из степени опреснения поверхности воды и редко обособленно от других факторов опреснения. Это затрудняет установление индивидуальной роли стока в процессах ледообразования. Кроме того, рассмотрение роли речного стока в процессах ледообразования связывают прежде всего с его долгосрочными изменениями, в то время как и ежегодная изменчивость способна оказывать влияние. Изучение влияния многолетних изменений и межгодовых колебаний стока р. Лены на формирование ледяного покрова в море Лаптевых является основной целью данного исследования.

Материал и методы

Сведения о колебаниях площади льда в море Лаптевых были получены из открытой базы данных, регулярно пополняемой Национальным центром данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center) (Sea ..., 2017). Архив содержит ежедневные и ежемесячные данные о площади льда в арктических морях с октября 1978 г. по настоящее время, полученные с помощью микроволновых радиометров. Эти приборы позволяют получать данные о морской поверхности при любой освещенности, в том числе в течение полярной ночи, а также при наличии облачности.

Информация о расходах воды р. Лены взята из открытой электронной базы данных (Arctic ..., 2023). Были отобраны ежедневные данные о расходах воды в районе гидрологического поста «Кюсюр» с 1978 по 2022 гг.

Средние годовые значения объема речного стока, а также средняя, минимальная и максимальная годовые площади льда рассчитывались за гидрологический год (с 1 октября по 30 сентября). Это позволяет рассматривать полностью период накопления и расходования влаги в речном бассейне и учитывать характеристики льда только внутри одного цикла образования и разрушения льда.

Результаты и обсуждение

С начала регулярных спутниковых наблюдений за состоянием ледяного покрова Арктики в 1978 г. площадь льда в морях Северного Ледовитого океана имела тенденцию к сокращению. В море Лаптевых средняя годовая площадь льда с 1978 по 2022 гг. сокращалась со скоростью 3866 км²/год. Крупные регулярные отрицательные аномалии площади льда стали отмечаться на акватории моря с 2004 г. (рис. 1).

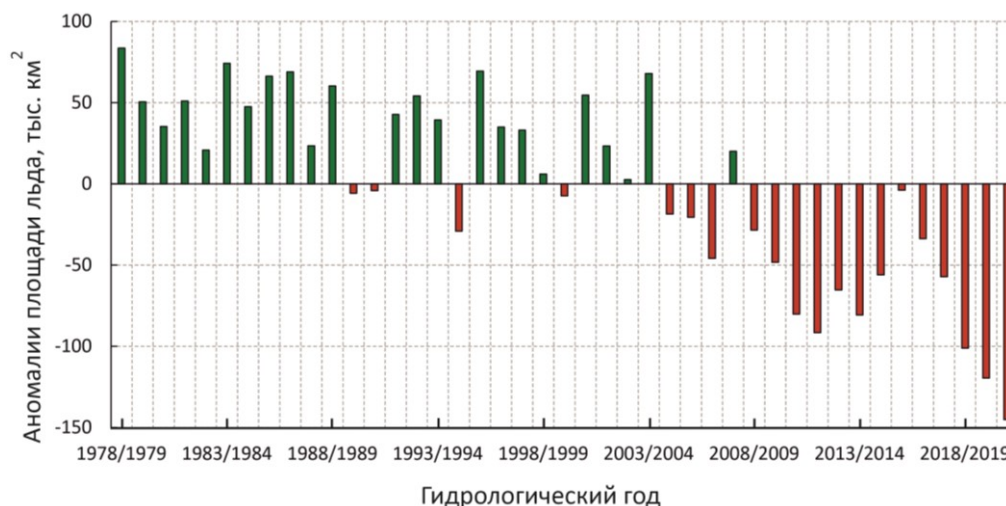


Рис. 1. Аномалии средней годовой площади льда в море Лаптевых

Fig. 1. Anomalies of the annual ice area in the Laptev Sea

Обусловлены эти аномалии сокращением площади льда в теплый период года. Площадь льда с июня по октябрь значительно сократилась (рис. 2). Минимальная площадь льда в море Лаптевых наблюдается в сентябре. Средняя площадь льда в сентябре в 2004–2022 гг. составляла всего 85100 км², что на 225000 км² меньше, чем в этом же месяце в 1979–2003 гг. Зимой море Лаптевых продолжало ежегодно полностью покрываться льдом, однако в теплый период участилось почти полное очищение акватории моря от льда. Минимальное покрытие льдом акватории моря было зафиксировано в сентябре 2014 г., когда площадь льда сократилась до 3629 км².

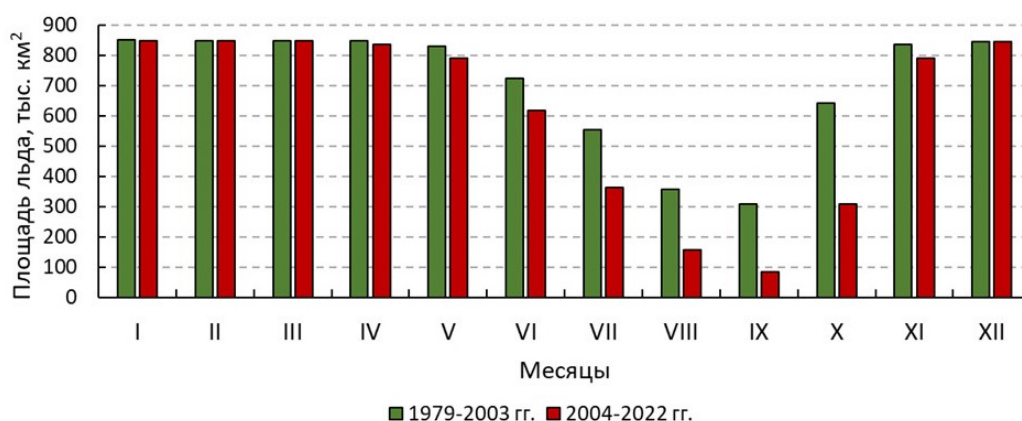


Рис. 2. Средняя месячная площадь льда в море Лаптевых
Fig. 2. Monthly average ice area in the Laptev Sea

В конце 1970-х годов началось повышение температуры воздуха в Арктике (Малинин, Вайновский, 2018). Между площадью морского льда в Арктике и приповерхностной температурой воздуха существует сильная обратная зависимость (Изменения ..., 2015). Приповерхностная температура воздуха оказывает влияние на образование и таяние льда непосредственно в момент воздействия. Однако на длительных промежутках времени эффект от воздействия возрастающих температур может накапливаться и оказывать отсроченное влияние на ледовые процессы в арктических морях. Результаты экспериментов SHEBA и данные скаттерометра QuikSCAT показали (Seasonal ..., 2007), что среднее количество поглощенной солнечной радиации системой лед–океан сильно зависит от времени начала таяния морского льда. Более позднее начало таяния льда способствует поддержанию низких температур над поверхностью льда, замедлению его таяния, увеличению площади остаточных льдов в конце ледового сезона и более раннему началу нового ледового сезона. Таким образом, при регулярном раннем начале таяния льда под действием возросшей средней весенней температуры процесс таяния льда может ускоряться год от года. В конечном итоге накопление тепла в системе лед–океан–атмосфера приведет к довольно резкой перестройке ледового режима.

Изменчивость площади морского льда в Арктике также содержит в себе составляющую, определяемую колебаниями притока теплой и соленой атлантической воды и смещениями границы ее распространения (Изменения ..., 2015). Благодаря значительному притоку речных вод на поверхности моря Лаптевых формируется опресненный слой. Нижележащие слои заняты трансформированными водами Северной Атлантики, прошедшими через Арктический бассейн, Баренцево и Карское моря (Seasol ..., 2006; Toward ..., 2008; Impact ..., 2010). Они намного плотнее поверхностного слоя благодаря высокой солености и поддерживают устойчивость стратификации даже при сильном выхолаживании поверхности. Таким образом, пикноклин в море Лаптевых формируется благодаря соленостной, а не температурной стратификации. Анализ современных и более ранних наблюдений показал, что увеличение притока атлантических вод в Северный Ледовитый океан началось в 1980-х гг., усилилось в середине 2000-х гг. и продолжается в настоящее время (Arctic ..., 2010; Observations ..., 2013).

Установлено, что сильное ветровое перемешивание в верхнем 50-метровом слое эффективно переносит тепло атлантических вод к поверхности, способствуя увеличению температуры и солености в галоклине и ослаблению стратификации (Arctic ..., 2010). В Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана величина частоты Вьясяля-Брента в слое 100–300 м с 1970-х по 1990-е годы снизилась на 30 %. А в 2007 году наблюдалась потеря стабильности водной толщи, что выразилось в отрицательных аномалиях частоты Вьясяля-Брента в верхней части слоя атлантических вод и нижней части галоклина (Arctic ..., 2010).

Неустойчивость стратификации провоцирует перемешивание водной толщи, затрудняя образование льда. Это, по-видимому, и является причиной отрицательных аномалий площади льда в море Лаптевых, ставших регулярными с 2004 г. (рис. 1). Отрицательные аномалии площади льда стали регулярно наблюдаться в это же время в Карском море (Булавина, 2023). Вероятно, на ледовые процессы в этих морях повлияли процессы, происходящие в Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана и приведшие к сильному снижению устойчивости стратификации в середине 2000-х гг. Следовательно, факторы, способные поддерживать устойчивую стратификацию водной толщи, могут влиять на процесс ледообразования и, соответственно, на площадь морского льда коренным образом.

Поступление речных вод играет важную роль в поддержании стратификации в море Лаптевых. Усиление галоклина минимизирует восходящий поток тепла от глубинных вод. Это способствует быстрому выхолаживанию поверхности и образованию ледяного покрова (Consequences ..., 2016). Большую часть речного стока в море Лаптевых обеспечивает р. Лена – около 70 %. Поэтому поверхностный опресненный слой формируется преимущественно из вод этой реки.

Сток Лены в 1978–2022 гг. имел слабую тенденцию к увеличению (рис. 3). Согласно тесту значимости тренда Манна-Кендалла и t-тесту линейной регрессии восходящий тренд объема стока Лены статистически значим. Сток Лены в этот период увеличивался в среднем на 2.1 км³/год. Таким образом, объем стока возрастал на 3.5 % каждые 10 лет.

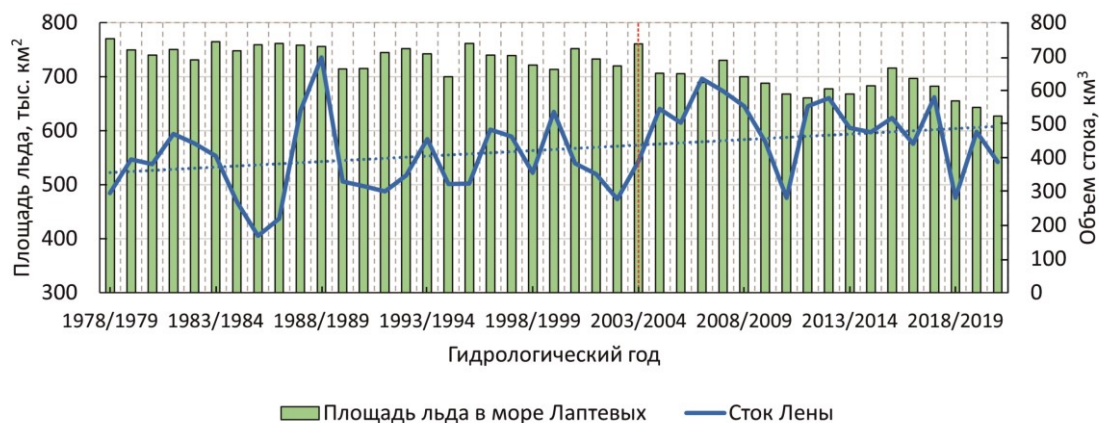


Рис. 3. Сток реки Лены и площадь льда в море Лаптевых (1978–2022 гг.)

Fig. 3. Lena River runoff and the area of ice in the Laptev Sea (1978–2022)

Нами выполнен поиск корреляционных зависимостей между объемом стока Лены и средней годовой площадью льда в море Лаптевых в периоды, отличающиеся по особенностям ледового режима. С 2004 по 2022 годы не только существенно сократилась средняя годовая площадь льда в море Лаптевых, но и изменился характер взаимосвязи между стоком реки и площадью льда. В 1978–2003 годах значимые корреляции между средней годовой площадью льда и стоком не обнаруживаются. Однако с 2004 по 2022 гг. отмечена значимая прямая корреляция между средним годовым стоком Лены и площадью льда в море Лаптевых. Вероятно, после произошедших изменений в поступлении атлантических

вод, стратификация в море Лаптевых стала менее устойчивой и достигает оптимальных для ледообразования величин только при высокой водности питающих рек.

Крупные отрицательные аномалии ледовитости, отмечаемые с 2004 г., привели к постепенному замещению многолетних льдов однолетними. Такая тенденция наблюдалась в течение последних десятилетий в морях Северного Ледовитого океана (Arctic ..., 2010; Арктический ..., 2013; Наумов, Гордеева, 2016). Однолетние льды тоньше и легче поддаются разрушению, а следовательно, более чувствительны к влиянию различных факторов. Усиление стратификации, изоляция тепла глубинных вод и снижение солености поверхностного слоя морской воды в годы с большим объемом речного стока может способствовать ускорению процессов ледообразования осенью и формированию более толстых однолетних льдов. Толстый однолетний лед имеет более длительный период таяния и с большей вероятностью способен «пережить» летний сезон.

Нами рассмотрена внутригодовая динамика площади льда в море Лаптевых в годы, максимально отличающиеся друг от друга по объему стока Лены. По формуле Чегодаева была рассчитана обеспеченность средних годовых расходов воды в створе гидрологического поста «Кюсюр» и определены маловодные (с обеспеченностью > 75 %) и многоводные (с обеспеченностью < 25 %) годы для Лены.

В годы высокой водности реки Лены образование льда в море Лаптевых начиналось раньше, чем в годы низкой водности (рис. 4). А таяние льда, напротив, происходило более интенсивно в маловодные годы. Таким образом, в многоводные для Лены годы в море Лаптевых к началу нового ледового сезона сохранялась большая площадь льда, чем в маловодные. Различия в площади ледяного покрова моря Лаптевых в годы различной водности Лены наблюдались с июня по октябрь.

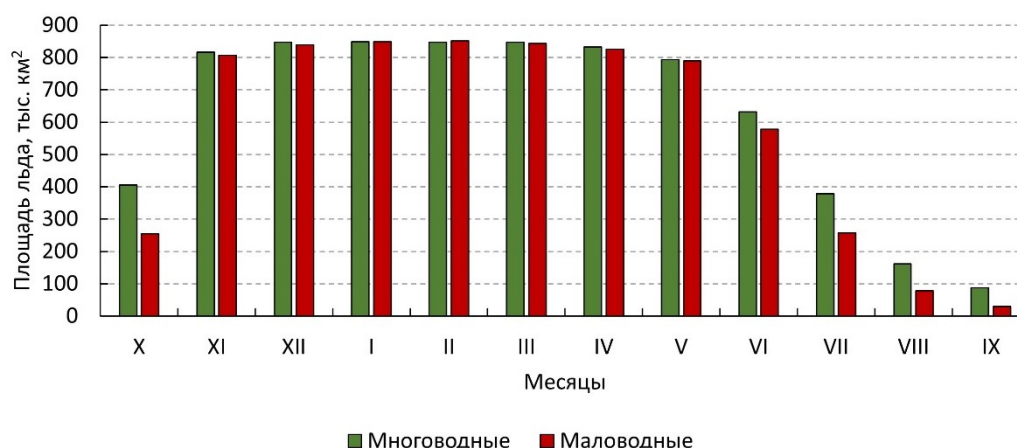


Рис. 4. Площадь льда в море Лаптевых в годы высокой и низкой водности реки Лены (2004–2022 гг.)

Fig. 4. The area of ice in the Laptev Sea during the years of high and low water content of the Lena River (2004–2022)

Заключение

Ледовый режим моря Лаптевых претерпел значительные изменения в последние два десятилетия. С 2004 года отмечены ежегодные отрицательные аномалии площади льда в море Лаптевых. В летний сезон акватория моря почти полностью освобождается от льда. Это привело к замещению многолетних льдов однолетними. Средняя годовая ледовитость стала определяться преимущественно площадью льда, успевшего образоваться в текущем ледовом сезоне. После произошедших изменений в ледовом режиме моря Лаптевых влияние речного стока на процессы сезонного формирования и разрушения морского льда возросло. С 2004 по 2022 годы средняя годовая площадь льда в море Лаптевых прямо коррелирует с колебаниями стока реки Лены. В этот период высокая водность Лены способствовала ускорению процессов ледообразования, удлинению периода стабилизации, сдвигу начала таяния льда на более поздние сроки.

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации пелагических экосистем морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ госрегистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. *Арктический* ледяной покров становится сезонным? / В. В. Иванов, В. А. Алексеев, Т. А. Алексеева, Н. В. Колдунов, И. А. Репина, А. В. Смирнов // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50. DOI: 10.7868/S0205961413040076
2. Булавина А. С. Влияние колебаний стока Оби и Енисея на площадь ледяного покрова Карского моря // Тр. Кольского науч. центра РАН. Сер. Естественные и гуманитарные науки. 2023. Т. 2, № 3. С. 10–18. DOI: 10.37614/2949-1185.2023.2.3.002
3. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении / Г. В. Алексеев, В. Ф. Радионов, Е. И. Александров, Н. Е. Иванов, Н. Е. Харланенкова // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1(103). С. 32–41.
4. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Уч. зап. Рос. гос. гидромет. ун-та. 2018. № 53. С. 34–55.
5. Наумов Л. М., Гордеева С. М. Изменчивость ледовитости Карского моря // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования: Матер. молод. науч. конф., г. Севастополь, 25–29 апреля 2016 г. Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т РАН, 2016. С. 332–337.
6. Осадчиев А. А. Перенос и трансформация речного стока в российской Арктике // Вестн. РАН. 2021. Т. 91, № 12. С. 1137–1143. DOI: 10.31857/S0869587321120082
7. Analysis of the Arctic system for freshwater cycle intensification: Observations and expectations / M. Rawlins, M. Steele, M. Holland, J. Adam, J. Cherry, J. Francis, P. Groisman, L. Hinzman, T. Huntington, D. Kane, J. Kimball, R. Kwok, R. Lammers, C. Lee, D. Lettenmaier, K. McDonald, E. Podest, J. Pundsack, B. Rudels, M. Serreze, A. Shiklomanov, O. Skagseth, T. Troy, C. Vorosmarty, M. Wensnahan, E. Wood, R. Woodgate, D. Yang, K. Zhang, and T. Zhang // J. Climate. 2010. № 23(21). P. 5715–5737. DOI: 10.1175/2010JCLI3421.1
8. Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap / I. V. Polyakov, L. A. Timokhov, V. A. Alexeev, S. Bacon, I. A. Dmitrenko, L. Fortier, I. E. Frolov, J. C. Gascard, E. Hansen, V. V. Ivanov, S. Laxon, C. Mauritzen, D. K. Perovich, K. Shimada, H. L. Simmons, V. T. Sokolov, M. Steele, J. Toole // J. Phys. Oceanogr. 2010. Vol. 40, iss. 12. P. 2743–2756. DOI: 10.1175/2010JPO4339.1
9. Arctic Great Rivers Observatory, Version 20231204 / J. W. McClelland, S. E. Tank, R. G. M. Spencer, A. I. Shiklomanov, S. Zolkos, R. M. Holmes // Discharge Dataset. 2023. URL: <https://www.arcticrivers.org/data/> (дата обращения 11.12.2023).
10. Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic Ocean stratification, circulation, and sea ice cover / A. Nummelin, M. Ilıcak, C. Li, L. Smedsrud // J. Geophys. Res. 2016. Vol. 121, iss. 1. P. 617–637. DOI: 10.1002/2015JC011156
11. Impact of the Arctic Ocean Atlantic water layer on Siberian shelf hydrography / I. A. Dmitrenko, S. A. Kirillov, L. B. Tremblay, D. Bauch, J. A. Hölemann, T. Krumpen, H. Kassens, C. Wegner, G. Heinemann, D. Schroder // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115, iss. C8. DOI: 10.1029/2009JC006020
12. Observations of water masses and circulation with focus on the Eurasian Basin of the Arctic Ocean from the 1990s to the late 2000s / B. Rudels, U. Schauer, G. Björk, M. Korhonen, S. Pisarev, B. Rabe, A. Wisotzki // Ocean Sci. 2013. № 9. P. 147–169. DOI: 10.5194/os-9-147-2013
13. Rudels B. Arctic Ocean circulation, processes and water masses: A description of observations and ideas with focus on the period prior to the International Polar Year 2007–2009 // Prog. Oceanogr. 2013. Vol. 132. P. 22–67. DOI: 10.1016/j.pocan.2013.11.006
14. Sea Ice Index, Version 3 [Data Set] / F. Fetterer, K. Knowles, W. N. Meier, M. Savoie, A. K. Windnagel. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2017. URL: <https://doi.org/10.7265/N5K072F8> (дата обращения 05.02.2024).

15. *Seasonal variability of Atlantic water on the continental slope of the Laptev Sea during 2002–2004* / I. A. Dmitrenko, I. V. Polyakov, S. A. Kirillov, L. A. Timokhov, H. L. Simmons, V. V. Ivanov, D. Walsh // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2006. Vol. 244, iss. 3–4. P. 735–743. DOI: 10.1016/j.epsl.2006.01.067
16. *Seasonal evolution and interannual variability of the local solar energy absorbed by the Arctic sea ice–ocean system* / D. K. Perovich, S. V. Nghiem, T. Markus, A. Schweiger // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, iss. C3. DOI: 10.1029/2006JC003558
17. *Steele M., Boyd T.* Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, iss. C5. P. 10419–10435. DOI: 10.1029/98JC00580
18. *Toward a warmer Arctic Ocean: Spreading of the early 21st century Atlantic water warm anomaly along the Eurasian Basin margins* / I. A. Dmitrenko, I. V. Polyakov, S. A. Kirillov, L. A. Timokhov, E. Frolov, V. T. Sokolov, H. L. Simmons, V. V. Ivanov, D. Walsh // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, iss. C5. DOI: 10.1029/2007JC004158

References

1. Ivanov V. V., Alekseev V. A., Alekseeva T. A., Koldunov N. V., Repina I. A., Smirnov A. V. *Arkticheskiy ledyanoy pokrov stanovitsya sezonnyy?* [Does Arctic Ocean ice cover become seasonal?]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Exploring the Earth from Space], 2013, No. 4, p. 50 (In Russ.). DOI: 10.7868/S0205961413040076
2. Bulavina A. S. *Vliyanie kolebaniy stoka Obi i Eniseya na ploshchad' ledyanogo pokrova Karskogo morya* [The effect of fluctuations of the Ob and Yenisei rivers runoff on the area of the Kara Sea ice cover]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Estectvennye i gumanitarnye nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS. Series: Natural Sciences and Humanities], 2023, Vol. 2, No. 3, pp. 10–18 (In Russ.). DOI: 10.37614/2949-1185.2023.2.3.002
3. Alekseev G. V., Radionov V. F., Aleksandrov E. I., Ivanov N. E., Kharlanenkova N. E. *Izmeneniya klimata Arktiki pri global'nom poteplenii* [Arctic climate change under global warming]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Arctic and Antarctic Research], 2015, No. 1(103), pp. 32–41 (In Russ.).
4. Malinin V. N., Vaynovskiy P. A. *O prichinakh pervogo potepleniya Arktiki v XX stoletii* [On the causes of the first warming of the Arctic in the 20th centry]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University], 2018, No. 53, pp. 34–55 (In Russ.).
5. Naumov L. M., Gordeeva S. M. *Izmenchivost' ledovitosti Karskogo morya* [Variability of the ice cover of the Kara Sea]. *Kompleksnye issledovaniya morey Rossii: operativnaya okeanografiya i ekspeditsionnye issledovaniya: Materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii (g. Sevastopol', 25–29 aprelya 2016 g.)* [Comprehensive research of the seas of Russia: operational oceanography and expeditionary research: Proceedings of the Youth Scientific Conference]. Sevastopol, Marine hydrophysics Institute of the RAS, 2016, pp. 332–337 (In Russ.).
6. Osadchiev A. A. *Perenos i transformatsiya rechnogo stoka v Rossiyskoy Arktike* [Transfer and transformation of river flow in the Russian Arctic]. *Vestnik RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2021, Vol. 91, No. 12, pp. 1137–1143 (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869587321120082
7. Rawlins M., Steele M., Holland M., Adam J., Cherry J., Francis J., Groisman P., Hinzman L., Huntington T., Kane D., Kimball J., Kwok R., Lammers R., Lee C., Lettenmaier D., McDonald K., Podest E., Pundsack J., Rudels B., Serreze M., Shiklomanov A., Skagseth O., Troy T., Vorosmarty C., Wensnahan M., Wood E., Woodgate R., Yang D., Zhang K., Zhang T. *Analysis of the Arctic system for freshwater cycle intensification: Observations and expectations*. *J. Climate*, 2010, No. 23(21), pp. 5715–5737. DOI: 10.1175/2010JCLI3421.1
8. Polyakov I. V., Timokhov L. A., Alexeev V. A., Bacon S., Dmitrenko I. A., Fortier L., Frolov I. E., Gascard J. C., Hansen E., Ivanov V. V., Laxon S., Mauritzen C., Perovich D., Shimada K., Simmons H. L., Sokolov V. T., Steele M., Toole J. *Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap*. *J. Phys. Oceanogr.*, 2010, Vol. 40, iss. 12, pp. 2743–2756. DOI: 10.1175/2010JPO4339.1

9. McClelland J. W., Tank S. E., Spencer R. G. M., Shiklomanov A. I., Zolkos S., Holmes R. M. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, 2023. Available at: <https://www.arcticrivers.org/data/> (accessed 11.12.2023)
10. Nummelin A., Ilicak M., Li C., Smedsrud L. Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic Ocean stratification, circulation, and sea ice cover. *J. Geophys. Res.*, 2016, Vol. 121, iss. 1, pp. 617–637. DOI: 10.1002/2015JC011156
11. Dmitrenko I. A., Kirillov S. A., Tremblay L. B., Bauch D., Hölemann J. A., Krumpen T., Kassens H., Wegner C., Heinemann G., Schroder D. Impact of the Arctic Ocean Atlantic water layer on Siberian shelf hydrography. *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, iss. C8. DOI: 10.1029/2009JC006020
12. Rudels B., Schauer U., Bjork G., Korhonen M., Pisarev S., Rabe B., Wisotzki A. Observations of water masses and circulation with focus on the Eurasian Basin of the Arctic Ocean from the 1990s to the late 2000s. *Ocean Sci.*, 2013, No. 9, pp. 147–169. DOI: 10.5194/os-9-147-2013
13. Rudels B. Arctic Ocean circulation, processes and water masses: A description of observations and ideas with focus on the period prior to the International Polar Year 2007–2009. *Prog. Oceanogr.*, 2013, Vol. 132, pp. 22–67. DOI: 10.1016/j.pocean.2013.11.006
14. Fetterer F., Knowles K., Meier W. N., Savoie M., Windnagel A. K. Sea Ice Index, Version 3. Data Set. Boulder, Colorado USA, National Snow and Ice Data Center, 2017. Available at: <https://doi.org/10.7265/N5K072F8> (accessed 05.02.2024)
15. Dmitrenko I. A., Polyakov I. V., Kirillov S. A., Timokhov L. A., Simmons H. L., Ivanov V. V., Walsh D. Seasonal variability of Atlantic water on the continental slope of the Laptev Sea during 2002–2004. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2006, Vol. 244, iss. 3–4, pp. 735–743. DOI: 10.1016/j.epsl.2006.01.067
16. Perovich D. K., Nghiem S. V., Markus T., Schweiger A. Seasonal evolution and interannual variability of the local solar energy absorbed by the Arctic sea ice–ocean system. *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, iss. C3. DOI: 10.1029/2006JC003558
17. Steele M., Boyd T. Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 1998, Vol. 103, iss. C5, pp. 10419–10435. DOI: 10.1029/98JC00580
18. Dmitrenko I. A., Polyakov I. V., Kirillov S. A., Timokhov L. A., Frolov E., Sokolov V. T., Simmons H. L., Ivanov V. V., Walsh D. Toward a warmer Arctic Ocean: Spreading of the early 21st century Atlantic water warm anomaly along the Eurasian Basin margins. *J. Geophys. Res.*, 2008, Vol. 113, iss. C5. DOI: 10.1029/2007JC004158

Информация об авторе

Булавина Александра Сергеевна – кандидат географических наук, научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-1173-9324>

Information about the author

Aleksandra S. Bulavina – PhD (Geography), Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1173-9324>

Статья поступила в редакцию 29.03.2024; одобрена после рецензирования 04.04.2024; принята к публикации 09.04.2024.
The article was submitted 29.03.2024; approved after reviewing 04.04.2024; accepted for publication 09.04.2024.