

Научная статья
УДК 551.467 (268.52)
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.3.002

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТОКА ОБИ И ЕНИСЕЯ НА ПЛОЩАДЬ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА КАРСКОГО МОРЯ

Александра Сергеевна Булавина

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

Аннотация

В работе рассмотрена связь изменений площади льда в Карском море с колебаниями стока Оби и Енисея с 1978 по 2022 гг. Статистически значимые положительные корреляции между суммарным стоком Оби и Енисея и площадью льда в Карском море обнаружены в период с 2004 по 2022 гг. В годы высокой водности Оби и Енисея наблюдалось ускорение процессов ледообразования, удлинение периода стабилизации ледяного покрова, сдвиг начала таяния льда на более поздние сроки и большая устойчивость льда к разрушению в летний сезон.

Ключевые слова:

Карское море, лед, Обь, Енисей, речной сток

Original article

THE EFFECT OF FLUCTUATIONS OF THE OB AND YENISEI RIVERS RUNOFF ON THE AREA OF THE KARA SEA ICE COVER

Alexandra S. Bulavina

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

Abstract

The paper considers the dependence of changes in the area of ice in the Kara Sea with fluctuations of the Ob and Yenisei rivers runoff during the period from 1978 to 2022. Over the period from 2004 to 2022, statistically significant positive correlations between the summary runoff of the Ob and Yenisei and the area of ice in the Kara Sea were found. There was an acceleration of ice formation processes, an elongation of the ice stabilization period, the beginning of ice melting in a later date and a higher resistance of ice to destruction during summer in the high-water content years of the Ob and Yenisei rivers.

Keywords:

Kara Sea, marine ice, Ob River, Yenisei River, river runoff

Введение

Освоение Арктики – приоритетная задача России. Карское море – одно из наиболее интенсивно исследуемых арктических морей. В последние годы на побережье и акватории моря реализуются крупные проекты по добыче нефти и газа (Никитин, Дзюбло, 2017; Поиски ..., 2018). Обеспечение безопасного судоходства в сложных ледовых условиях Карского моря способствует успешному освоению шельфовых месторождений. Необходимо совершенствовать инструменты прогноза ледовых условий Карского моря, а это невозможно без понимания основных закономерностей формирования ледяного покрова.

Карское море и его водосбор – уникальная природная система. Большой объем речного стока в Карское море обуславливает высокую значимость происходящих на водосборе процессов для гидрологического и экологического состояния моря. Более 80 % объема материкового стока в Карское море обеспечивают реки Обь и Енисей. В среднем в год Обь выносит в море 406 км³ воды, Енисей – 585 км³. В отдельные годы сток Оби достигал 571 км³ или снижался до 267 км³, а сток Енисея – 699 и 473 км³ соответственно (рассчитано по данным 1936–2022 гг.). Изменения объемов стока Оби и Енисея оказывают существенное влияние на гидрологический режим моря, а по некоторым оценкам, и на циркуляцию вод во всем Арктическом бассейне (Кулаков, 2012). Многолетние и сезонные колебания стока этих рек, а также разброс во времени смены фаз водного режима на Оби и Енисее определяют гидрологические условия в Карском море в период образования и таяния льда.

Цель работы – исследование временных колебаний стока Оби и Енисея и их влияние на ледовые процессы в Карском море.

Большую часть года Карское море покрыто сплошным ледяным покровом. Ледообразование обычно начинается в сентябре на северо-востоке моря среди остаточных льдов, распространяясь на юго-запад в сторону чистой воды. При средних условиях ледообразование моря длится в течение 75 сут. (с 5 сентября по 18 ноября). При экстремально позднем замерзании оно начинается 20 сентября и заканчивается 24 декабря (продолжительность 95 сут.), а при экстремально раннем, соответственно, 20 августа и 15 октября (продолжительность 56 сут.) (Ледяные ..., 2006). Таяние ледяного покрова начинается в первой половине июня. Очагами очищения выступают участки наиболее тонких льдов вблизи заприпайных полыней, расположенных в Обь-Енисейском районе и к западу от п-ова Ямал. Юго-западная часть моря полностью очищается от льда в сентябре. В северо-восточной части моря полного очищения от льда не происходит – средняя ледовитость к концу сентября составляет 44 % (Ледяные ..., 2006).

В последние десятилетия ледовый режим Карского моря претерпевает изменения. Ледовитость в зимний период года значительно уменьшилась, а также изменилось соотношение различных форм льда (Наумов, Гордеева, 2016). Изучение роли отдельных факторов этого процесса поможет выработать безопасную стратегию логистического и промышленного освоения данного участка Арктики и снизить экологические риски.

Материал и методы

Сведения о ледовой обстановке в Карском море были получены из открытой базы данных, опубликованной в 2017 г. и регулярно пополняемой Национальным центром данных по снегу и льду (NSIDC) США (Sea ..., 2017). Архив содержит ежедневные и ежемесячные числовые данные о площади льда в Карском море с октября 1978 г. по настоящее время. Информация о расположении льда на акватории моря представлена в виде последовательных изображений концентрации морского льда в формате PNG. Измерения начались с помощью микроволновых радиометров SMMR и продолжились с использованием прибора SSM/I, а затем прибора SSMIS, который поставляет данные и в настоящее время. 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 Оби и Енисея была взята из электронной базы данных (Arctic ..., 2023), собранной национальными гидрологическими учреждениями России (Росгидромет), Соединенных Штатов Америки (Геологическая служба США) и Канады (Служба водных ресурсов Канады). Из базы были отобраны ежедневные данные о расходах воды Оби в районе гидрологического поста “Салехард” и Енисея в районе гидрологического поста “Игарка” 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 целый период накопления и расходования влаги в речном бассейне и учитывать характеристики льда только внутри одного цикла образования и разрушения льда. Каждый временной ряд был предварительно проверен на однородность в соответствии с “Методическими рекомендациями по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным” (2010), разработанными в Государственном гидрологическом институте. Анализ трендов был использован для оценки тенденций изменчивости исследуемых характеристик. Построение линии тренда проводилось путем составления линейного уравнения по методу наименьших квадратов. Значимость тренда оценивалась по критерию Стьюдента.

Данные о средней месячной температуре воздуха над Карским морем получены из архива данных, находящегося в открытом доступе на сайте Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration) (NOAA ..., 2021).

Результаты и обсуждение

С начала наблюдений в 1978 г. средняя годовая площадь ледяного покрова Карского моря имела выраженный отрицательный тренд. Площадь льда с 1978 по 2022 гг. в среднем сокращалась на 5502 км² в год.

Наиболее интенсивное сокращение площади льда началось в середине 2000-х гг. В Карском море с 2004 г. ежегодно наблюдались отрицательные аномалии ледовитости (рис. 1).

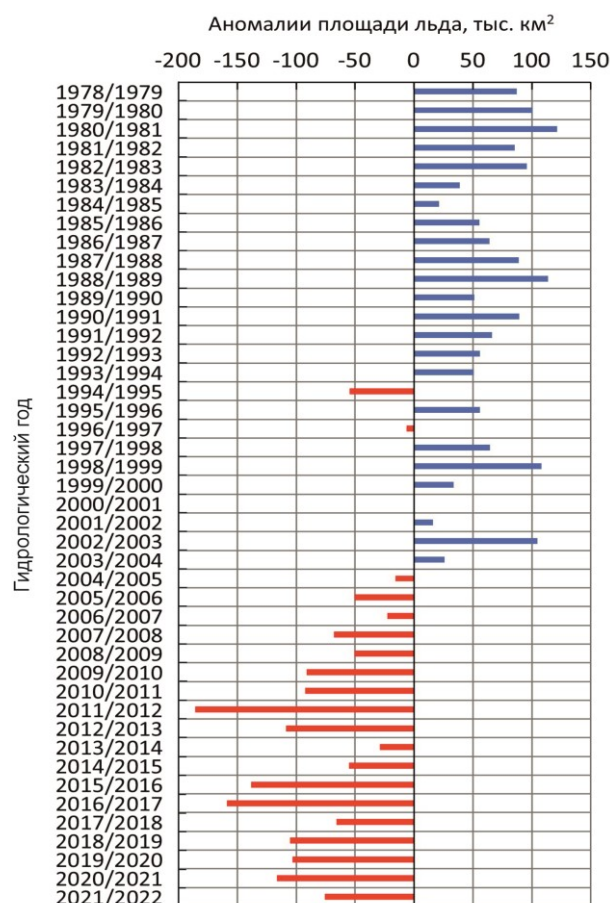


Рис. 1. Аномалии средней годовой площади льда в Карском море

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

Сокращение средней годовой площади льда произошло преимущественно за счет увеличения площади открытой воды в теплый период года. На графике минимальной площади льда в Карском море показано, что в течение периода наблюдений в отдельные годы площадь льда летом сокращалась до 30000–50000 км². Однако с 2004 г. столь малые значения площади льда стали повторяться ежегодно (рис. 2).

Средняя площадь льда в Карском море в летний сезон 2004–2022 гг. по сравнению с 1979–2003 гг. уменьшилась на 211000 км². Сокращение площади льда произошло как в юго-западной части моря (на 37.1 %), так и в северо-восточной (на 37.8 %).

Северо-восточная часть Карского моря с 2004 г. стала почти полностью освобождаться от льда в сентябре (рис. 3). Зимой море покрывалось льдом полностью, но небольшие участки открытой воды в отдельные годы на акватории оставались.

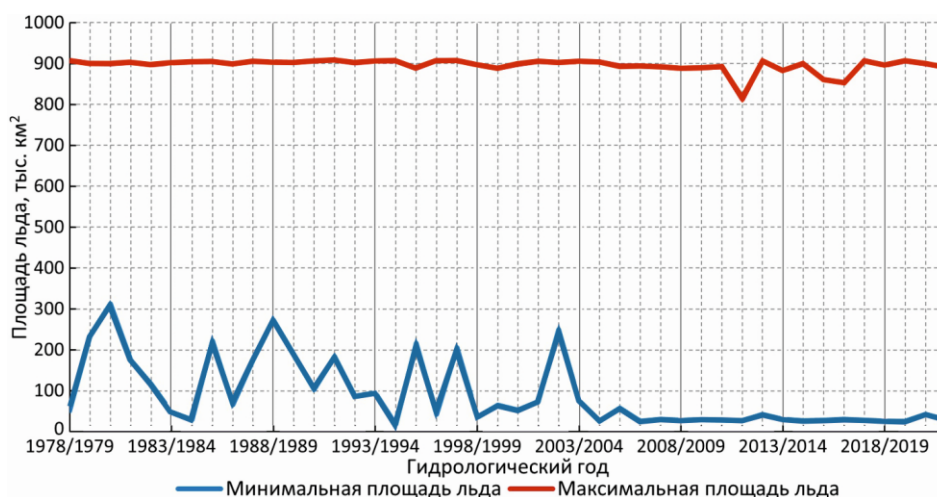


Рис. 2. Минимальная и максимальная площади льда в Карском море
Fig. 2. Minimal and maximal area of ice in the Kara Sea

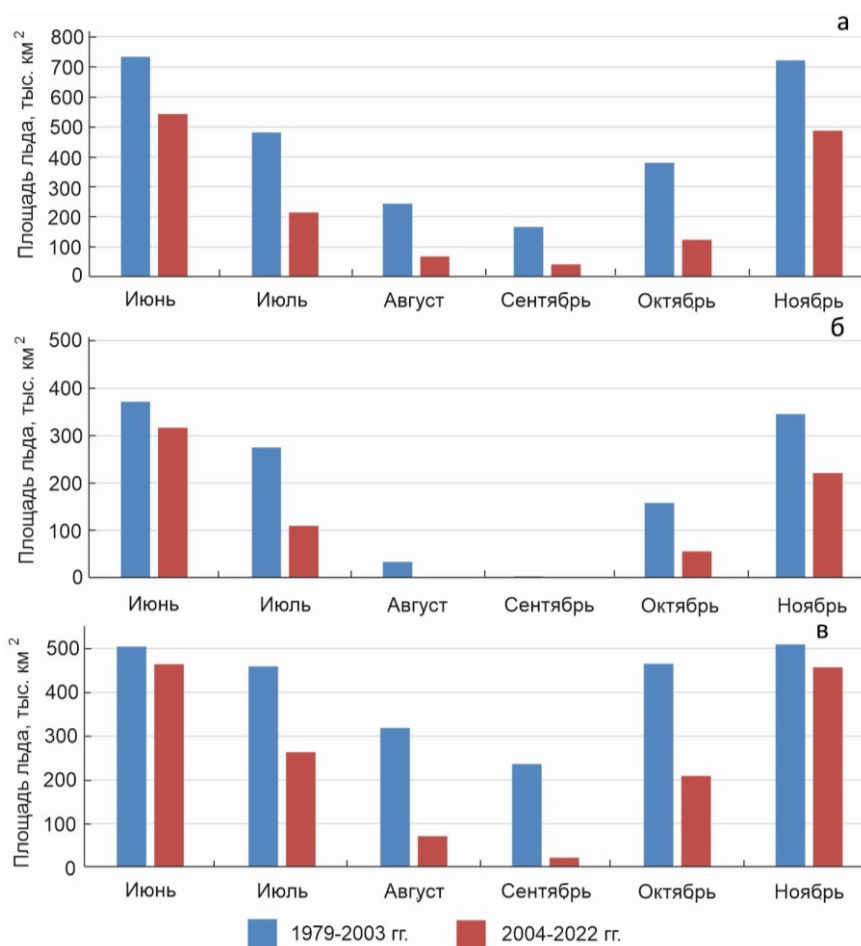


Рис. 3. Площадь льда в Карском море в июне–ноябре 1979–2003 и 2004–2022 гг.:

а – море в целом; б – юго-западная часть; в – северо-восточная часть

Fig. 3. The area of ice in the Kara Sea in 1979–2003 and 2004–2022:

а – the Kara Sea; б – the south-west of the Kara Sea; в – the north-east of the Kara Sea

Сокращение площади морского льда в морях Северного Ледовитого океана летом обусловлено в основном повышением температуры воздуха (Матвеева и др., 2020). Сток Оби и Енисея в период роста температуры воздуха над Карским морем и интенсивной перестройки его ледового режима не претерпевал значимых направленных изменений (рис. 4).

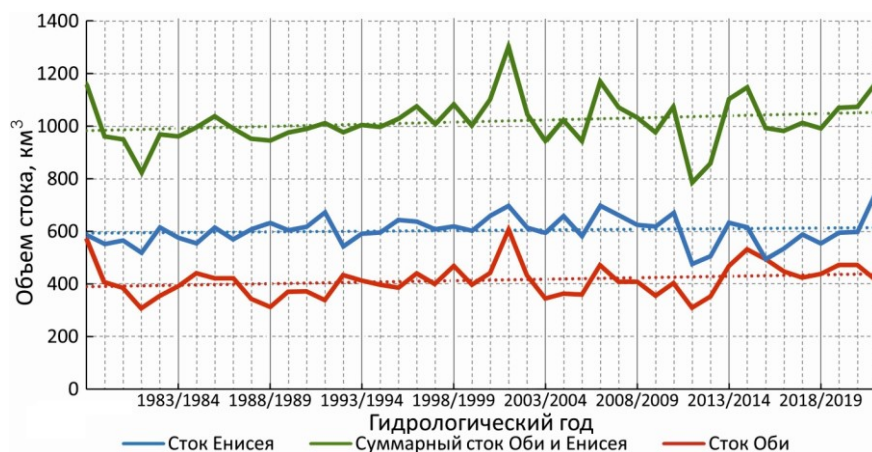


Рис. 4. Средний годовой сток Оби и Енисея в 1978–2022 гг.

Fig. 4. The annual Ob and Yenisei rivers runoff in 1978–2022

Был выполнен поиск корреляционных зависимостей между объемом стока Оби и Енисея и площадью льда в Карском море с 1978 по 2022 гг. С 1978 по 2022 и с 1978 по 2003 годы значимые корреляции между площадью льда в Карском море и стоком Оби и Енисея не обнаруживаются ни для средних годовых, ни для средних месячных значений. Однако с 2004 по 2022 гг. отмечена значимая прямая корреляция между суммарным годовым стоком Оби и Енисея и средней годовой площадью льда в Карском море (таблица).

Зависимость средней годовой площади льда в Карском море от стока Оби и Енисея
Correlation between the annual Ob and Yenisei rivers runoff and the area of ice in the Kara Sea

Предиктор	Коэффициент корреляции r	Стандартная ошибка	Критическое значение t ($p = 0.05$)	Фактическое значение t
1978–2022 гг.				
Суммарный годовой сток Оби и Енисея	0.003	0.15	2.02	0.02
Средний годовой сток Оби	–0.132	0.15	2.02	0.86
Средний годовой сток Енисея	0.160	0.15	2.02	1.05
1978–2003 гг.				
Суммарный годовой сток Оби и Енисея	–0.303	0.20	2.07	1.53
Средний годовой сток Оби	–0.261	0.20	2.07	1.30
Средний годовой сток Енисея	–0.213	0.20	2.07	1.05
2004–2022 гг.				
Суммарный годовой сток Оби и Енисея	0.604	0.20	2.12	3.03
Средний годовой сток Оби	0.163	0.25	2.12	0.66
Средний годовой сток Енисея	0.711	0.18	2.12	4.04

Вероятно, это связано с особенностями влияния солёности на образование льда. Формирование обширного поверхностного опреснённого слоя в начале ледового сезона усиливает процессы ледообразования.

За череду лет с крупными отрицательными аномалиями ледовитости значительная площадь моря была освобождена от старого льда и занята однолетними формами льда. В работе Л. М. Наумова и С. М. Гордеевой (2016) выполнен анализ площадей, занимаемых различными формами льда в Карском море в 1997/1998 и 2014/2015 годах. Зимой 1997/1998 г. старый лед имел площадь, соизмеримую с площадью других форм льда, в то время как зимой 2014/2015 г. старый лед почти исчез.

Однолетние льды тоньше и легче поддаются разрушению. Так как в последние два десятилетия Карское море практически лишилось многолетних льдов, средняя годовая ледовитость стала зависеть в первую очередь от площади однолетних льдов. Снижение солёности в годы с большим объемом речного стока может способствовать ускорению процессов ледообразования осенью и формированию более толстых однолетних льдов в такие годы. Толстый однолетний лед имеет более длительный период таяния, а также с большей вероятностью способен пережить летний сезон.

По формуле Чегодаева была рассчитана обеспеченность средних годовых расходов воды в створе гидрологических постов “Салехард” и “Игарка” и определены маловодные (с обеспеченностью $> 75\%$) и многоводные (с обеспеченностью $< 25\%$) годы для Оби и Енисея. Солёность морской воды к началу процессов ледообразования определяется водностью предшествующего года. Поэтому площадь льда оценивалась для лет, следующих за годами высокой и низкой водности обеих рек. Зависимость процессов ледообразования и ледотаяния от водности Оби и Енисея не прослеживалась в период до 2004 г. С 2004 по 2022 годы наблюдалось статистически значимое различие в скорости нарастания и разрушения ледяного покрова в годы, следующие за таковыми высокой водности Оби и Енисея и следующие за годами низкой водности этих рек.

Учитывая обусловленность речного стока и температуры воздуха над морем изменениями циркуляции атмосферы, существует вероятность, что обнаруженная зависимость – результат регулярного наступления холодных лет вслед за влажными ввиду цикличности атмосферных колебаний. Были рассчитаны средние годовые, осенние и летние температуры над Карским морем в 2004–2022 гг. Статистически значимых различий в температуре воздуха над морем в годы, следующие за годами высокой водности Оби и Енисея и в годы, следующие за годами низкой водности, не обнаружено.

Циклы образования и разрушения ледяного покрова в Карском море в годы различной водности (2004–2022) показаны на рис. 5. В годы, которым предшествовало многоводье, нарастание ледяного покрова происходило более интенсивно, и море полностью покрывалось льдом уже в начале января, далее следовал длительный период стабилизации ледяного покрова. В годы, которым предшествовало маловодье, полное покрытие моря льдом происходило только в начале февраля, а стабилизации ледяного покрова вовсе не наблюдалось. Сокращение площади ледяного покрова в такие годы начиналось в среднем на 10 дней раньше и продолжалось вплоть до конца сентября. В годы, которым предшествовало многоводье, разрушение ледяного покрова позже начиналось и приостанавливалось уже в августе.

Летнее таяние морского льда в Арктике в сильной степени зависит от различий в величине отраженной и поглощенной солнечной радиации между покрытой льдом и открытой частями акватории. Данные экспериментов SHEBA и данные скаттерометра QuikSCAT показывают (Seasonal ..., 2007), что среднее количество поглощенной солнечной радиации системой лед–океан с апреля по сентябрь зависит от начала таяния морского льда и слабо связано с продолжительностью таяния или окончанием его таяния. 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.

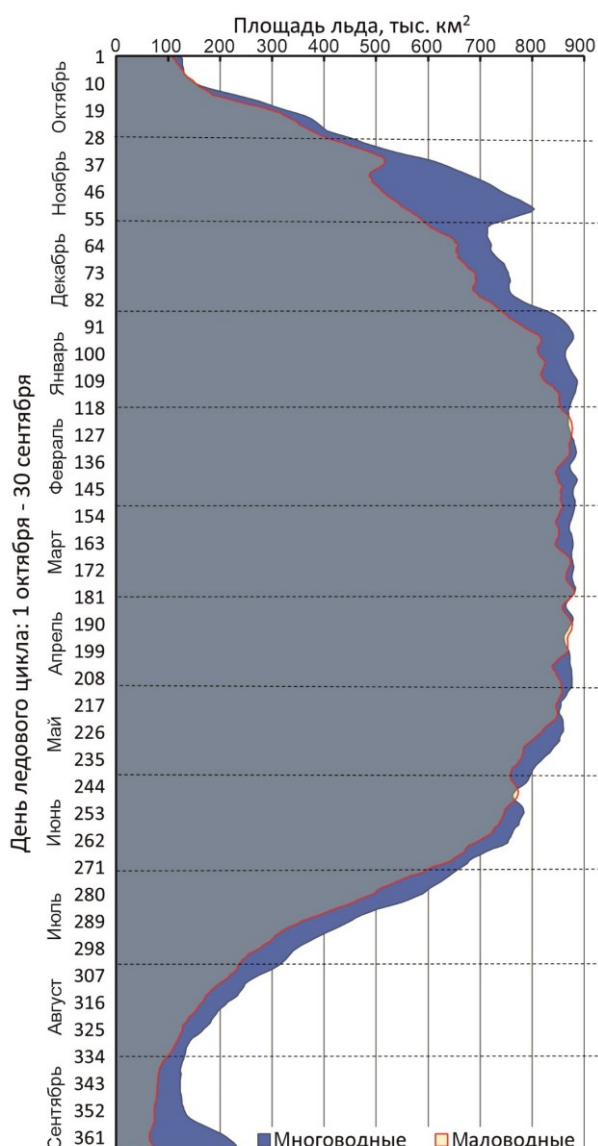


Рис. 5. Площадь ледяного покрова в годы высокой и низкой водности Оби и Енисея (2004–2022 гг.)

Fig. 5. The area of the Kara Sea ice cover during the years of high and low water content of the Ob and Yenisei rivers (2004–2022)

Закключение

Ледовый режим Карского моря претерпел значительные изменения в последние два десятилетия. С 2004 года в Карском море наблюдались ежегодные отрицательные аномалии ледовитости. Средняя площадь льда в Карском море в летний сезон 2004–2022 гг. по сравнению с 1979–2003 гг. сократилась на 37.5 %. Северо-восточная часть моря летом ежегодно стала почти полностью освобождаться от льда. Это привело к замещению многолетних льдов однолетними. Средняя годовая ледовитость определяется преимущественно площадью льда, образовавшегося в текущем ледовом сезоне. Речной сток способен влиять на скорость процессов ледообразования. Таким образом, влияние водности Оби и Енисея на площадь льда в Карском море в последние два десятилетия возросло.

С 2004 по 2022 годы наблюдались статистически значимые положительные корреляции между суммарным стоком Оби и Енисея и площадью льда в Карском море. Высокая водность Оби и

Енисей способствовала ускорению процессов ледообразования, удлинению периода стабилизации, сдвигу начала таяния льда на более поздние сроки и большей устойчивости льда к разрушению в летний сезон.

Работа выполнена по теме “Планктонные сообщества арктических морей в условиях современных климатических изменений и антропогенного воздействия” (№ госрегистрации 121091600105-4) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Кулаков М. Ю. О новом подходе к моделированию циркуляции вод арктических морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2(92). С. 55–62.
2. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Г. К. Зубакина. СПб: Изд. ААНИИ, 2006. 272 с.
3. Матвеева Т. А., Семенов В. А., Астафьева Е. С. Ледовитость арктических морей и ее связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // Лед и снег. 2020. Т. 60, № 1. С. 134–148.
4. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определение их расчетных значений по неоднородным данным / А. В. Рождественский, А. Г. Лобанова (ред.). СПб.: Изд-во “Нестор-История”, 2010, 162 с.
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. Никитин Б. А., Дзюбло А. Д. Перспективы освоения газовых ресурсов шельфа арктических морей России // Научно-технический сборник “Вести газовой науки”. 2017. Т. 4, № 32. С. 15–24.
7. Поиски и разведка месторождений и залежей углеводородов ПАО “Газпром” в России / В. В. Рыбальченко, А. Е. Рыжов, В. А. Скоробогатов, Д. Я. Хабибуллин // Научно-технический сборник “Вести газовой науки”. 2018. Т. 3, № 35. С. 46–57.
8. Arctic Great Rivers Observatory / J. W. McClelland, S. E. Tank, R. G. M. Spencer, A. I. Shiklomanov, S. Zolkos, R. M. Holmes // Discharge Dataset. 2023. URL: <https://arcticgreatrivers.org/data/> (дата обращения 13.02.2023).
9. NOAA. Monthly mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset. Climate Prediction Center, National Weather Service, NOAA, 2021. URL: <http://nomad2.ncep.noaa.gov> (дата обращения 03.03.2023).
10. 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 13.02.2023).
11. 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. № 112. C03005. DOI: 10.1029/2006JC003558

References

1. Kulakov M. Ju. O novom podhode k modelirovaniju cirkuljacii vod arkticheskikh morej [About a new approach to modeling the circulation of Arctic seas]. *Problemy Arktiki i Antarkтики* [Arctic and Antarctic Research], 2012, No. 2(92), pp. 55–62. (In Russ.).
2. Zubakin G. K. *Ledjanye obrazovanija morej Zapadnoj Arktiki* [Ice formations of the seas of the Western Arctic], Saint-Petersburg, Publ. AANII, 2006, 272 p. (In Russ.).
3. Matveeva T. A., Semenov V. A., Astaf'eva E. S. Ledovitost' arkticheskikh morej i ee svjaz' s prizemnoj temperaturoj vozduha v Severnom polusharii [Arctic Sea ice coverage and its relation to the surface air temperature in the Northern Hemisphere]. *Led i sneg* [Ice and snow], 2020, Vol. 60, No. 1, pp. 134–148. (In Russ.).
4. Rozhdestvenskij A. V., Lobanova A. G. *Metodicheskie rekomendacii po ocenke odnorodnosti gidrologicheskikh harakteristik i opredelenie ih raschetnyh znachenij po neodnorodnym dannym* [Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values based on heterogeneous data], Saint-Petersburg, Publ. “Nestor-Istoriya”, 2010, 162 p. (In Russ.).
5. Naumov L. M., Gordееva S. M. *Izmenchivost' ledovitosti Karskogo morja* [Variability of ice in the Kara Sea]. *Kompleksnye issledovanija morej Rossii: operativnaja okeanografija i jekspedicionnye issledovanija. Materialy molodezhnoj nauchnoj konferencii “Kompleksnye issledovanija morej Rossii: operativnaja okeanografija i jekspedicionnye issledovanija” (g. Sevastopol', 25–29 aprlja 2016 g.)* [Proceedings of the Youth Scientific Conference “Integrated research of the Russian Seas: operational oceanography and expedition research”]. Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 332–337. (In Russ.).

6. Nikitin B. A., Dzjublo A. D. Perspektivy osvoenija gazovyh resursov shel'fa arkticheskikh morej Rossii [Prospects for development of Russian Arctic offshore gas resources]. *Nauchno-tehnicheskij sbornik "Vesti gazovoj nauki"* [Scientific-Technical Collection Book "News of gas science"], 2017, Vol. 4, No. 32, pp. 15–24. (In Russ.).
7. Rybal'chenko V. V., Ryzhov A. E., Skorobogatov V. A., Habibullin D. Ja. Poiski i razvedka mestorozhdenij i zalezhej uglevodorodov PAO "Gazprom" v Rossii [Searching and prospecting of hydrocarbon fields and deposits by the enterprises of the Gazprom PJSC in Russia]. *Nauchno-tehnicheskij sbornik "Vesti gazovoj nauki"* [Scientific-Technical Collection Book "News of gas science"], 2018. Vol. 3, No. 35, pp. 46–57. (In Russ.).
8. 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://arcticgreatrivers.org/data/> (accessed 13.02.2023).
9. NOAA. Monthly mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset. Climate Prediction Center, National Weather Service, NOAA, 2021. Available at: <http://nomad2.ncep.noaa.gov> (accessed 03.03.2023).
10. 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 13.02.2023).
11. 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. *Journal Geophysical Research*, 2007, No. 112, C03005, doi: 10.1029/2006JC003558

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 23.03.2023; одобрена после рецензирования 10.04.2023; принята к публикации 13.04.2023.
The article was submitted 23.03.2023; approved after reviewing 10.04.2023; accepted for publication 13.04.2023.