

## ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ И УРОВЕНЬ ОКЕАНА В НИЗКИХ ШИРОТАХ И СЕВЕРНЫЙ МОРСКОЙ ПУТЬ

Г. В. Алексеев, С. А. Солдатенко, Н. И. Глок

*ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,  
Россия, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38,  
e-mail: alexgv@aari.ru*

В статье представлены оценки связи между аномалиями температуры поверхности и уровня океана в низких широтах и температурой воздуха и площадью морского льда на акватории арктических морей, по которым проходит Северный морской путь. Исходными данными послужили архивы станционных метеорологических данных, атмосферные и океанические реанализы, многолетние ряды данных об уровне моря, сведения о площади арктических морских льдов. Использованы методы многомерного корреляционного и регрессионного анализа. Корреляция аномалий температуры поверхности океана и температуры воздуха в Арктике указала на области в океане с максимальными коэффициентами корреляции между ними. Выделились области в тропиках Северной Атлантики и в районе Индо-Тихоокеанской положительной аномалии температуры поверхности океана. В этих областях также расположены источники данных об уровне океана – Ки-Уэст в тропиках Северной Атлантики и Манила в тропиках западной части Тихого океана, ряды данных в которых наиболее тесно связаны с аномалиями сезонной температуры воздуха в Арктике и при запаздывании последних до 5 лет. Температура поверхности океана в тропиках Северной Атлантики и уровень п. Манила оказались эффективными предикторами для сезонных аномалий температуры воздуха и площади морского льда на акватории морей Северного морского пути. Прогнозные расчеты площади льда по опытной регрессионной модели с заблаговременностью в 4 года показали оправдываемость 91 % и эффективность 30 % (на исходной выборке).

**Ключевые слова:** океан, ТПО, уровень, Арктика, СМП, температура воздуха, морской лед

### Введение

Современные исследования, включающие численные эксперименты с глобальными связанными климатическими моделями, подтверждают ключевую роль океана и его взаимодействия с атмосферой в формировании долгопериодных погодных и климатических колебаний (Polonsky, 2019; Ruprich-Robert et al., 2021; Schmitt, 2018; Gulev et al., 2013; Williams et al., 2023). В этом взаимодействии преобладает влияние из низких широт океана, поскольку здесь накапливается основная часть солнечного тепла (Alekseev et al., 2021; Årthun, Eldevik, 2016; Hoerling et al., 2001) и затем распределяется циркуляцией атмосферы и океана в средние и высокие широты.

Низкоширотные аномалии температуры поверхности океана (ТПО) усиливают моды атмосферной циркуляции, включающие волны Россби (Ding et al., 2014;

Wettstein, Deser, 2014; Ye et al., 2015), циркуляцию Хэдли (Goss et al., 2016), колебания Маддена-Джулиана (МЮ) (Yoo et al., 2011, 2012) и другие, передающие воздействия из низких в умеренные и высокие широты. Аномалии ТПО в низких широтах Северной Атлантики особенно влияют на атмосферную циркуляцию и синоптические аномалии температуры воздуха (Hou et al., 2023; Wettstein, Deser, 2014) и морского льда в приарктических и арктических (Алексеев и др., 2016; Yu et al., 2024; Alekseev et al., 2021; Ding et al., 2014; Goss et al., 2016; Meehl et al., 2018; Ye et al., 2015; Yoo et al., 2011, 2012) областях.

В то же время низкочастотная изменчивость в океане может возбуждать долгопериодную часть изменчивости в атмосфере и служить предиктором сезонных и межгодовых изменений климата. При этом перенос океанического тепла в Северной Атлантике из низких в высокие широты приводит к задержке аномалий климата в высоких и средних широтах на несколько лет (Алексеев и др., 2016, 2019; Alekseev et al., 2021).

ТПО в низких широтах Атлантического (Нестеров, 2013; Семенов и др., 2014), Индийского и Тихого океанов (Deckker, 2016; Ding et al., 2014), где изменения ТПО формируются с участием АМО, Эль-Ниньо (ENSO) (Мохов, Смирнов, 2006; Нестеров, 2000), солнечной активности и орбитальных изменений инсоляции (Alekseev et al., 2020), наиболее часто используется для мониторинга и прогнозирования колебаний климата. Источником информации могут быть также ряды данных об уровне океана с более длительной историей наблюдений, чем за ТПО. Уровень океана изменяется из-за повышения температуры верхнего слоя океана (50 % и 38 % от общего увеличения за 1971–2018 и 1901–2018 годы соответственно) и таяния ледяных щитов и ледников (42 % и 41 % от общего увеличения за те же годы) (IPCC, 2023). Эти изменения происходят в течение периодов от нескольких лет до десятилетий и, следовательно, могут служить индикаторами изменения климата с аналогичными масштабами (Малинин, Смирнов, 2022).

В статье исследуется связь между температурой поверхности и уровнем океана в низких широтах и температурой воздуха и протяженностью морского льда в арктических морях, через которые проходит Северный морской путь (СМП), и оценивается ее потенциал для прогноза сезонных аномалий.

## Материалы и методы

В исследовании использованы данные реанализа HadISST (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>), многолетние ряды данных об уровне моря из архива PSMSL (<https://psmsl.org/data/>), данные о протяженности морского льда в Арктике, представленные на сайте ААНИИ (<http://wdc.aari.ru/datasets/>), архивы метеорологических наблюдений (<http://meteo.ru/data/>), климатические индексы, представленные на сайте: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>. Для оценки связей между временными рядами были применены методы корреляционного и регрессионного анализа.

## Результаты

Аномалии средней температуры воздуха в Арктике сравнивались с аномалиями ТПО в каждом узле сетки реанализа HadISST. Коэффициенты корреляции между ними рассчитывались при разных запаздываниях аномалий температуры воздуха относительно аномалий ТПО. На рисунке 1 показано распределение коэффициентов корреляции, на котором выделяется область океана, где ТПО оказывают наибольшее влияние на сезонные аномалии температуры воздуха в Арктике. Максимальные коэффициенты корреляции отмечаются между осенней ТПО и температурой воздуха при запаздывании последней на 3 года. Эта область океана находится в тропиках Северной Атлантики.

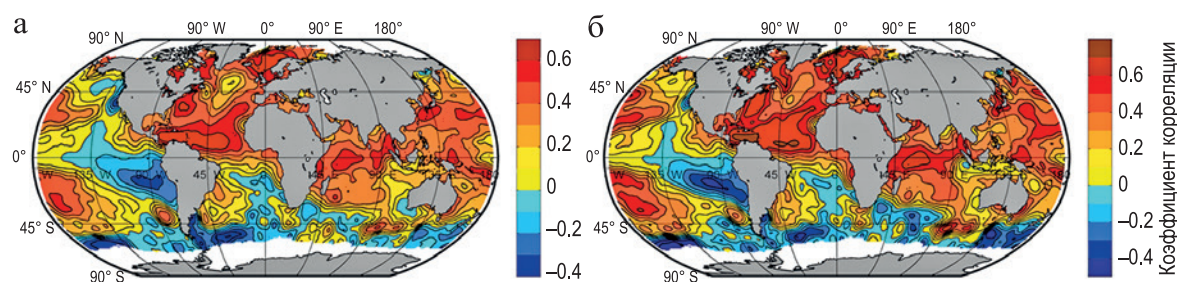


Рис. 1 – Коэффициенты корреляции между аномалиями температуры поверхности океана в октябре и средними сезонными аномалиями температуры воздуха в Арктике (70–87.5° с. ш.) летом (а) и осенью (б) 1979–2023 гг. с трехлетним запаздыванием аномалий температуры воздуха

Из рисунка 1 следует, что аномалия ТПО в области тропической Северной Атлантики может служить предиктором аномалий температуры воздуха в Арктике. Тесная связь между температурой воздуха и ледовитостью делает возможным использование ТПО и как предиктора аномалий ледовитости в Арктике (Prokhorova et al., 2023). Для удобства реализации подобных возможностей ТПО во влияющей области усреднялась в координатах 5–25° с. ш., 10–60° з. д. и использовалась в качестве предиктора протяженности морских льдов в Арктике с запаздыванием последних на 3 года в работе (Алексеев и др., 2019). Наиболее тесная связь была установлена с осенней или октябрьской ТПО, на которую приходится сезонный максимум и наибольший многолетний рост ТПО.

Ранее авторы работы (Enfield et al., 1999) выделили область тропиков Северной Атлантики (5.5–23.5° с. ш., 15–57.5° з. д.) при исследовании диполя ТПО «Тропики Северной Атлантики – Тропики Южной Атлантики». Эта область практически совпадает с выделенной нами, а 100 % корреляция между ТПО в обеих областях подтверждает их одинаковую межгодовую изменчивость. Аномалии ТПО в области, выделенной в (Enfield et al., 1999) и обозначенные как “ $T_{NA}$ ”, выбраны как индекс аномальности ТПО в тропиках Северной Атлантики и накапливаются в виде многолетних рядов ежегодных аномалий ТПО, начиная с 1948 г. (<https://psl.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml>). Ниже при построении опытных регрессий ТПО на ПТВ нами использованы

индексы “ $T_{NA}$ ”. Недавно обнаружена связь между ТПО в области Indo-Pacific warm pool (IPWP) и концентрацией морского льда на северо-востоке Канады (Yu et al., 2024). IPWP можно рассматривать как еще одну тропическую область, ТПО в которой влияет на Арктику.

Поскольку уровень океана изменяется, в том числе из-за колебаний температуры верхнего слоя (IPCC, 2023), то можно ожидать связь между аномалиями уровня, наблюдения за которым имеют более длительную историю, и аномалиями климата в Арктике. Для нахождения ожидаемой связи выбраны пункты наблюдений за уровнем в областях “ $T_{NA}$ ” и IPWP. В области “ $T_{NA}$ ” это пункт Ки-Уэст во Флоридском проливе, а в области IPWP – п. Манила (Филиппины). Расчеты корреляции между уровнем в выбранных пунктах и температурой воздуха в Арктике подтвердили наличие значимой связи и запаздываний аномалий температуры воздуха.

Вместе с аномалиями ТПО, связанными с температурой воздуха, аномалии уровня могут служить предикторами при прогнозе сезонных и межгодовых аномалий климата в Арктике. В таблице 1 приведены коэффициенты корреляции и запаздывания (в годах) аномалий температуры воздуха относительно аномалий ТПО и уровня.

Табл. 1 – Корреляция аномалий температуры поверхности и уровня океана с температурой воздуха в Арктике и ледовитостью в морях СМП с учетом запаздывания

Аномалия в океане	Арктика, температура		Моря СМП		Период, годы Источник данных
	70–90° с. ш.	120–180° в. д. Вост. Арктика	Температура воздуха	Ледовитость	
ТПО тропики СА, осень	0.74(+4) осень	0.66 (+3) осень	0.66 (+4) осень	0.72 (+4) октябрь	1950–2023 HadISST, NCEP
Уровень, Ки-Уэст, осень	0.77(+4) осень	0.77 (+3) осень	0.74 (+4) осень	0.77 (+4) октябрь	1950–2023, PMSL, NCEP
Уровень, Манила, осень	0.84(+6) осень	0.81 (+5) осень	0.75 (+5) осень	0.81 (+5) октябрь	1950–2023 PMSL, NCEP

Установленные связи межгодовых колебаний температуры поверхности и уровня океана в низких широтах с колебаниями температуры воздуха и площади, занятой льдом (ледовитость), в Арктике использованы для составления опытных прогностических уравнений множественной регрессии (таблица 2).

Опытные прогнозные расчеты, выполненные с использованием регрессионных моделей, показывают рост температуры воздуха на Северном морском пути в ближайшие 3–4 года. К 2027 г. в осенний сезон температура может увеличиться почти на 3 °C (рисунок 2а). Одновременно уменьшится осенняя ледовитость морей СМП. Рост температуры и сокращение площади, занятой морским льдом, обусловлены аномалией ТПО в тропиках, прежде всего в Северной Атлантике, где аномалия, отражаемая индексом “ $T_{NA}$ ”, осенью 2023 г. превысила три стандартных отклонения от среднего значения. Повышение ТПО во всей тропической области, сопровождаемое повышением уровня, также способствовало последующему распространению потепления к северу.

Табл. 2 – Уравнения регрессии температуры поверхности и уровня океана в низких широтах на приповерхностную температуру воздуха и ледовитость на акватории Северного морского пути<sup>1</sup>

№	Уравнение регрессии	За период	Характеристики уравнения		
			R	A, %	E, %
1	$T_{\text{СМП}}(g_{iv}) = 0.012H_{\text{KV}}(g_{iv} - 4) + 0.003H_{\text{M}}(g_{iv} - 5) - 38.0865$	1950–2022	0.81	74	20
2	$SIE(\text{СМП}_{10}) = -381.41T_{\text{NA}}(g_{10} - 4) - 2.58H_{\text{M}}(g_{iv} - 5) - 20800$	1974–2023	0.87	91	30

<sup>1</sup> **Примечание:**  $T_{\text{СМП}}$  – средняя приповерхностная температура воздуха в морях СМП (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря);  $T_{\text{NA}}$  – аномалия средней температуры поверхности океана в области тропической Северной Атлантики (5.5–23.5° с. ш., 15–57.5° з. ш.);  $H_{\text{KV}}$  – средний за сентябрь–ноябрь уровень океана в п. Ки-Уест (24.55° с. ш., 81.80° з. д.);  $H_{\text{M}}$  – средний за сентябрь–ноябрь уровень океана в п. Манила (14.5° с. ш., 120.97° в. д.);  $g_{iii}, iv$  – год, сезон (iii – лето, iv – осень);  $R$  – коэффициент множественной регрессии;  $SIE$  – протяженность льда (ледовитость); 10 – октябрь;  $A$  – оправдываемость прогноза на зависимой выборке при допустимой ошибке 0.674 СКО предиктанта;  $E$  – эффективность прогноза на зависимой выборке.

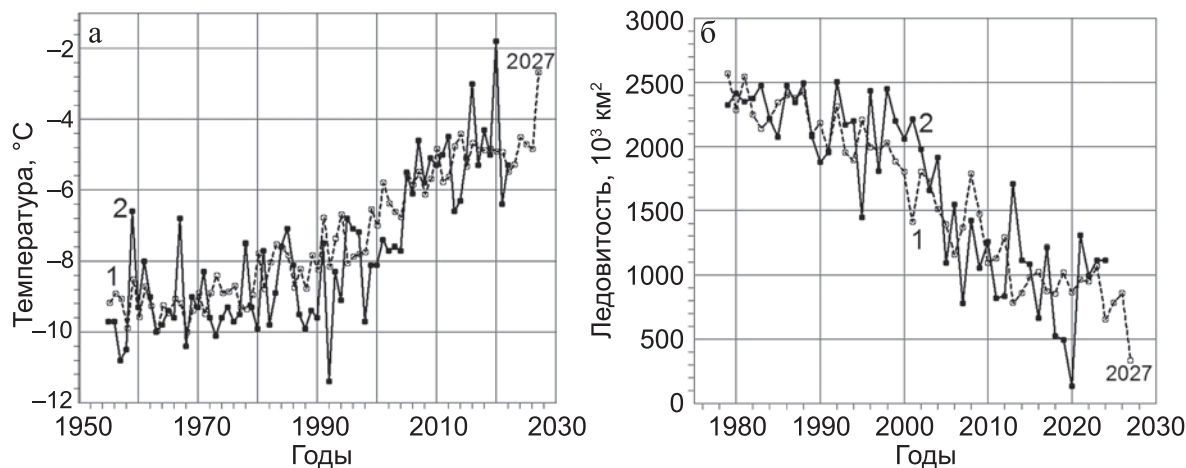


Рис. 2 – Расчетная (1) и фактическая (2) температура приземного воздуха осенью (а) и ледовитость в октябре (б) на Северном морском пути в 1974–2027 гг.

### Обсуждение

Реальность связи с запаздыванием и высокими коэффициентами корреляции между температурой поверхности и уровнем океана в тропиках и температурой воздуха и ледовитостью арктических морей, помимо очевидной статистической значимости, нуждается в указании на ее причины. Первой причиной является присутствие однозначных трендов в сопоставляемых рядах характеристик климата в Арктике и в низких широтах. Наибольший ее вклад будет в случае, когда коэффициент тренда в низких широтах равен или превышает коэффициент тренда в Арктике. Однако, корреляция между трендами не имеет запаздывания, но между отклонениями от трендов такое запаздывание появляется, хотя коэффициенты корреляции между ними значительно ниже, чем между рядами с трендами.



В случае уравнений регрессии в таблице 2 исключение трендов снижает коэффициент множественной регрессии для ледовитости СМП до 0.26, а для температуры воздуха до 0.43. При этом корреляция между отклонениями от тренда уровня п. Манила и ледовитости отсутствует, а между " $T_{NA}$ " и ледовитостью сохраняется при том же запаздывании ледовитости. Причина отличия в малом вкладе отклонений от тренда в ряду уровней (11 %) против 45 % в ряду " $T_{NA}$ " при 28 % в ряду ледовитости. Тот же эффект сохраняется и в случае уравнения для температуры воздуха. Таким образом, при сопоставлении климатических рядов необходимо сохранение тренда, который является основной климатической составляющей. Присутствие в рядах отклонений от тренда обеспечивает обнаружение запаздывания между соответствующими процессами, механизм которого связан со взаимодействием океана и атмосферы.

Для рассматриваемой связи такой механизм представлен в работах (Alekseev et al., 2021; Алексеев и др., 2019). Механизм удаленного опережающего влияния аномалий ТПО в тропиках Северной Атлантики на аномалии в СЛЮ связан с взаимодействием между циркуляционными структурами в атмосфере и океане, переносящими тепло в высокие широты. В атмосфере такими структурами являются циркуляционные ячейки Хедли и Ферреля, которые усиливаются при положительных аномалиях ТПО, и Северо-Атлантическое колебание, отрицательно коррелированное с аномалиями ТПО. Положительной аномалии ТПО в низких широтах соответствует отрицательный индекс САК и положительная аномалия ТПО в Северной Атлантике севернее 40° с. ш., которая через три года проявляется в Норвежском и Баренцевом морях.

Океаническая система циркуляции, включающая Гольфстрим, Северо-Атлантическое течение и его продолжения в Норвежском и Баренцевом морях, распространяет аномалии ТПО в приатлантическую Арктику с последующим через 3 года влиянием на температуру воздуха и морской лед в Арктическом бассейне. Начальным импульсом служит низкоширотная аномалия ТПО, которая вызывает перестройку циркуляции в атмосфере и океане с увеличением переноса тепла в Арктику, приток которого объясняет до 85 % межгодовой изменчивости среднемесячной ледовитости в СЛЮ в период от установления до начала таяния льда.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 23–47–10003).

### Список литературы

1. Алексеев Г. В., Вязилова А. Е., Глок Н. И., Иванов Н. Е., Харланенкова Н. Е. Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость // Арктика. Экология и экономика. 2019. Т. 3. № 35. С. 73–83. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-73-83>.
2. Алексеев Г. В., Кузьмина С. И., Уразгильдеева А. В., Бобылев Л. П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43–63. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-1-43-63>.

3. *Малинин В. Н., Смирнов М. А.* Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо – Южное колебание // Гидрометеорология и экология. 2022. Т. 68. С. 463–477. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-68-463-477>.
4. *Мохов И. И., Смирнов Д. А.* Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо – Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 5. С. 650–667.
5. *Нестеров Е. С.* Изменчивость характеристик атмосферы и океана в атлантико-европейском регионе в годы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья // Метеорология и гидрология. 2000. Т. 8. С. 74–83.
6. *Нестеров Е. С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. Москва, 2013. 144 с.
7. *Семенов В. А., Шелехова Е. А., Мохов И. И., Зуев В. В., Колтерманн К. П.* Влияние атлантического долгопериодного колебания на формирование аномальных климатических режимов в регионах северной Евразии по модельным расчетам // Доклады Академии Наук. 2014. Т. 459. № 6. С. 742–745.
8. *Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., Kharlanenkova N. E., Kulakov M. Y.* Influence of SST in low latitudes on the Arctic warming and sea ice // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. No. 1145. <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>.
9. *Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., Kharlanenkova N. E.* Climate change in the Arctic : causes and mechanisms // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 606. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012002>.
10. *Årthun M., Eldevik T.* On anomalous ocean heat transport toward the Arctic and associated climate predictability Journal of Climate. 2016. Vol. 29. No. 2. P. 689–704. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0448.1>.
11. *Deckker P.* The Indo-Pacific Warm Pool: critical to world oceanography and world climate // Geoscience Letters. 2016. Vol. 3. No. 20. <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0054-3>.
12. *Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., ... Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. No. 656. P. 553–597.
13. *Ding Q., Wallace J. M., Battisti D. S., Steig E. J., Gallant A. J. E., Kim H. J., Geng L.* Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland // Nature. 2014. Vol. 509. P. 209–212. <https://doi.org/10.1038/nature13260>.
14. *Enfield D. B., Mestas A. M., Mayer D. A., Cid-Serrano L.* How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999. Vol. 104. P. 7841–7848.
15. *Goss M., Feldstein S. B., Lee S.* Stationary wave interference and its relation to tropical convection and Arctic warming // Journal of Climate. 2016. Vol. 29. No. 4. P. 1369–1389. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0267.1>.
16. *Gulev S. K., Latif M., Keenlyside N., Park W., Koltermann K. P.* North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // Nature. 2013. Vol. 499. No. 7459. P. 464–467. <https://doi.org/10.1038/nature12268>.
17. *Hoerling M. P., Hurrell J. W., Xu T.* Tropical Origins for Recent North Atlantic Climate Change // Science. 2001. Vol. 292. No. 5514. P. 90–92.
18. *Hou Y., Johnson N. C., Chang C.-H., Sun W., Man K., Miao Y., Li X.* Cold Springs Over Mid-Latitude North America Induced by Tropical Atlantic Warming // Geophysical Research Letters. 2023. Vol. 50. No. 16. e2023GL104180.

19. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. 2391 pp.
20. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77. No. 3. P. 437–471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2).
21. Meehl G. A., Chung C. T. Y., Arblaster J. M., Holland M. M., Bitz C. M. Tropical decadal variability and the rate of Arctic sea ice decrease // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45. No. 20. P. 11,311–326,333.
22. Polonsky A. The ocean's role in climate change. Cambridge, UK: Cambridge Scholars Publishing, 2019. 294 p.
23. Prokhorova U., Alekseev G., Vyazilova A. Regional and remote influence on the sea ice in the Kara Sea // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11. No. 2. P. 254. <https://doi.org/10.3390/jmse11020254>.
24. Ruprich-Robert Y., Moreno-Chamarro E., Levine X., Bellucci A., Cassou C., Castruccio F., Davini P., Eade R., Gastineau G., Hermanson L., Hodson D., Lohmann K., Lopez-Parages J., Monerie P.-A., Nicoli D., Qasmi S., Roberts C. D., Sanchez-Gomez E., Danabasoglu G., ... Tourigny E. Impacts of Atlantic multidecadal variability on the tropical Pacific: a multi-model study // Npj. Climate and Atmospheric Science. 2021. Vol. 4. No. 33. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00188-5>.
25. Schmitt R. W. The ocean's role in climate // Oceanography. 2018. Vol. 31. No. 2. P. 32–40.
26. Wettstein J. J., Deser C. Internal variability in projections of twenty-first-century Arctic sea ice loss: Role of the large-scale atmospheric circulation // Journal of Climate. 2014. Vol. 27. No. 2. P. 527–550. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00839.1>.
27. Williams R. G., Ceppi P., Roussenov V., Katavouta A., Meijers A. J. S. The role of the Southern Ocean in the global climate response to carbon emissions // Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences. 2023. Vol. 381. No. 2249.
28. Ye K., Wu R., Liu Y. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2015. Vol. 120. No. 7. P. 2738–2753.
29. Yoo C., Feldstein S., Lee S. The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic amplification of surface air temperature during the 1979-2008 boreal winter // Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 38. No. 24.
30. Yoo C., Lee S., Feldstein S. B. Arctic response to an MJO-like tropical heating in an idealized GCM // Journal of the Atmospheric Sciences. 2012. Vol. 69. No. 8. P. 2379–2393. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0261.1>.
31. Yu L., Zhong S., Vihma T., Ding S., Sui C., Sun B. The IPWP as a capacitor for autumn sea ice loss in Northeastern Canada // Npj. Climate and Atmospheric Science. 2024. Vol. 7. No. 259. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00798-9>.

Статья поступила в редакцию 20.02.2025, одобрена к печати 06.06.2025.

**Для цитирования:** Алексеев Г. В., Солдатенко С. А., Глок Н. И. Температура поверхности и уровень океана в низких широтах и Северный морской путь // Океанологические исследования. 2025. № 53 (2). С. 110–120. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(2\).6](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(2).6).



## SURFACE TEMPERATURE AND OCEAN LEVEL AT LOW LATITUDES AND THE NORTHERN SEA ROUTE

G. V. Alekseev, S. A. Soldatenko, N. I. Glock

*Arctic and Antarctic Research Institute,  
38, Bering Str., Saint Petersburg, 199397, Russia,  
e-mail: alexgv@aari.ru*

The article presents estimates of the relationship between surface temperature and ocean level anomalies at low latitudes and air temperature and sea ice area in the Arctic seas along the Northern Sea Route. The initial data included archives of station meteorological data, atmospheric and oceanic reanalyses, long-term sea level data series, and Arctic sea ice area data. Multivariate correlation and regression analysis methods were used. The correlation of sea surface temperature and air temperature anomalies in the Arctic indicated areas in the ocean with the highest correlation coefficients between them. The areas in the tropical North Atlantic and in the Indo-Pacific positive sea surface temperature anomaly were identified. These areas also contain sources of sea level data – Key West in the tropical North Atlantic and Manila in the tropical western Pacific, the data series of which are most closely related to the anomalies of seasonal air temperature in the Arctic and with a lag of the latter up to 5 years. The sea surface temperature in the tropical North Atlantic and the Manila level turned out to be effective predictors for seasonal anomalies of air temperature and sea ice area in the waters of the seas of the Northern Sea Route. Forecast calculations of the ice area using an experimental regression model with a lead time of 4 years showed a correctness of 91 % and an efficiency of 30 % (on the original sample).

**Keywords:** Ocean, SST, level, Arctic, NSR, air temperature, sea ice

**Acknowledgement:** The work was supported by an RSF (23–47–10003).

### References

1. Alekseev, G. V., A. E. Vyazilova, N. I. Glock, N. E. Ivanov, and N. E. Kharlanenkova, 2019: Vliyanie anomalij temperatury vody v nizkih shirotah okeana na kolebaniya klimata Arktiki i ih predskazuemost' (The effect of water temperature anomalies at low latitudes of the ocean on Arctic climate variations and their predictability). *Arktika. Ekologiya i ekonomika*, **3** (35), 73–83, <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-73-83>.
2. Alekseev, G. V., N. I. Glock, A. E. Vyazilova, N. E. Kharlanenkova, and M. Y. Kulakov, 2021: Influence of SST in low latitudes on the Arctic warming and sea ice. *Journal of Marine Science and Engineering*, **9** (1145), <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>.
3. Alekseev, G. V., N. I. Glock, A. E. Vyazilova, and N. E. Kharlanenkova, 2020: Climate change in the Arctic : causes and mechanisms. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **606**, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012002>.
4. Alekseev, G. V., S. I. Kuzmina, A. V. Urazgildeeva, and L. P. Bobylev, 2016: Vliyanie atmosferyh perenosov tepla i vlagi na usilenie potepleniya v Arktike v zimnij period (Impact of Atmospheric Heat and Moisture Transport on Arctic Warming in Winter). *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*, **1**, 43–63, <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-1-43-63>.

5. Årthun, M. and T. Eldevik, 2016: On anomalous ocean heat transport toward the Arctic and associated climate predictability. *Journal of Climate*, **29** (2), 689–704, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0448.1>.
6. Deckker, P., 2016: The Indo-Pacific Warm Pool: critical to world oceanography and world climate. *Geoscience Letters*, **3** (20), <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0054-3>.
7. Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, ... F. Vitart, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137** (656), 553–597.
8. Ding, Q., J. M. Wallace, D. S. Battisti, E. J. Steig, A. J. E. Gallant, H. J. Kim, and L. Geng, 2014: Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland. *Nature*, **509** (7499), 209–212, <https://doi.org/10.1038/nature13260>.
9. Enfield, D. B., A. M. Mestas, D. A. Mayer, and L. Cid-Serrano, 1999: How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **104**, 7841–7848.
10. Goss, M., S. B. Feldstein, and S. Lee, 2016: Stationary wave interference and its relation to tropical convection and Arctic warming. *Journal of Climate*, **29** (4), 1369–1389, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0267.1>.
11. Gulev, S. K., M. Latif, N. Keenlyside, W. Park, and K. P. Koltermann, 2013: North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales. *Nature*, **499** (7459), 464–467, <https://doi.org/10.1038/nature12268>.
12. Hoerling, M. P., J. W. Hurrell, and T. Xu, 2001: Tropical Origins for Recent North Atlantic Climate Change. *Science*, **292** (5514), 90–92.
13. Hou, Y., N. C. Johnson, C.-H. Chang, W. Sun, K. Man, Y. Miao, and X. Li, 2023: Cold Springs Over Mid-Latitude North America Induced by Tropical Atlantic Warming. *Geophysical Research Letters*, **50** (16), e2023GL104180.
14. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, 2023: Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2391 p.
15. Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77** (3), 437–471, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2).
16. Malinin, V. N. and M. A. Smirnov, 2022: Izmenchivost' urovnya v tropicheskoj zone Tihogo okeana i El-Nino – Yuzhnoe kolebanie (Variability of the sea level in the tropical zone of the Pacific Ocean and El-Niño – Southern Oscillation). *Gidrometeorologiya i ekologiya*, **68**, 463–477, <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-68-463-477>.
17. Meehl, G. A., C. T. Y. Chung, J. M. Arblaster, M. M. Holland, and C. M. Bitz, 2018: Tropical decadal variability and the rate of Arctic sea ice decrease. *Geophysical Research Letters*, **45** (20), 11,311–326,333.
18. Mokhov, I. I. and D. A. Smirnov, 2006: Issledovanie vzaimnogo vliyanija processov El-Nino – Yuzhnoe kolebanie i Severo-Atlanticheskogo i Arkticheskogo kolebanij (Study of the mutual influence of the El-Niño – Southern Oscillation and the North Atlantic and Arctic Oscillations). *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, **42** (5), 650–667.
19. Nesterov, E. S., 2000: Izmenchivost' harakteristik atmosfery i okeana v Atlantiko-evropejskom regione v gody sobytij El-Nino i La-Ninya (Variability of atmospheric and ocean characteristics in

- the Atlantic-European region during El-Niño and La-Niña events). *Meteorologiya i gidrologiya*, **8**, 74–83.
20. Nesterov, E. S., 2013: *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean (North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean)*. Moscow, 144 p.
  21. Polonsky, A., 2019: *The ocean's role in climate change*. Cambridge Scholars Publishing, 294 p.
  22. Prokhorova, U., G. Alekseev, and A. Vyazilova, 2023: Regional and remote influence on the sea ice in the Kara Sea. *J. Mar. Sci. Eng.*, **11** (2), 254, <https://doi.org/10.3390/jmse11020254>.
  23. Ruprich-Robert, Y., E. Moreno-Chamarro, X. Levine, A. Bellucci, C. Cassou, F. Castruccio, P. Davini, R. Eade, G. Gastineau, L. Hermanson, D. Hodson, K. Lohmann, Lopez-J. Parages, P.-A. Monerie, D. Nicoli, S. Qasmi, C. D. Roberts, E. Sanchez-Gomez, G. Danabasoglu, ... E. Tourigny, 2021: Impacts of Atlantic multidecadal variability on the tropical Pacific: a multi-model study. *Npj. Climate and Atmospheric Science*, **4** (33), <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00188-5>.
  24. Schmitt, R. W., 2018: The ocean's role in climate. *Oceanography*, **31** (2), 32–40.
  25. Semenov, V. A., E. A. Shelekova, I. I. Mokhov, V. V. Zuev, and K. P. Kolterman, 2014: Vliyanie atlanticheskogo dolgoperiodnogo kolebaniya na formirovanie anomalnykh klimaticheskikh rezhimov v regionah severnoj Evrazii po model'nym raschetam (The influence of the Atlantic long-period oscillation on the formation of anomalous climatic regimes in the regions of northern Eurasia according to model calculations). *Doklady Akademii Nauk*, **459** (6), 742–745.
  26. Wettstein, J. J., and C. Deser, 2014: Internal variability in projections of twenty-first-century Arctic sea ice loss: Role of the large-scale atmospheric circulation. *Journal of Climate*, **27** (2), 527–550, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00839.1>.
  27. Williams, R. G., P. Ceppi, V. Roussenov, A. Katavouta, and A. J. S. Meijers, 2023: The role of the Southern Ocean in the global climate response to carbon emissions. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, **381** (2249).
  28. Ye, K., R. Wu, and Y. Liu, 2015: Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120** (7), 2738–2753.
  29. Yoo, C., S. Feldstein, and S. Lee, 2011: The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic amplification of surface air temperature during the 1979–2008 boreal winter. *Geophysical Research Letters*, **38** (24).
  30. Yoo, C., S. Lee, and S. B. Feldstein, 2012: Arctic response to an MJO-like tropical heating in an idealized GCM. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **69** (8), 2379–2393, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0261.1>.
  31. Yu, L., S. Zhong, T. Vihma, S. Ding, C. Sui, and B. Sun, 2024: The IPWP as a capacitor for autumn sea ice loss in Northeastern Canada. *Npj Climate and Atmospheric Science*, **7** (259), <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00798-9>.

Submitted 20.02.2025, accepted 06.06.2025.

**For citation:** Alekseev, G. V., S. A. Soldatenko, and N. I. Glock, 2025: Surface temperature and ocean level at low latitudes and the Northern Sea Route. *Journal of Oceanological Research*, **53** (2), 110–120, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(2\).6](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(2).6).