

СВЯЗЬ МЕЖДУ СОКРАЩЕНИЕМ МОРСКИХ ЛЬДОВ И РОСТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В АРКТИКЕ

© 2024 г. Г. В. Алексеев^{1,*}, Н. Е. Харланенкова¹

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

* e-mail: alexgv@aari.ru

Поступила в редакцию 06.06.2023 г.

После доработки 28.10.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Обнаружена связь между ростом межмесячного летнего сокращения и осенне-зимнего восстановления ледяного покрова и межмесячными изменениями приповерхностной температуры воздуха в морской Арктике по данным наблюдений за 1989–2020 гг. На этом основании определено, что положительный тренд средней температуры воздуха над акваторией Северного Ледовитого океана и над морями Северного морского пути в мае — июле уменьшился, а в ноябре и январе увеличился.

Ключевые слова: арктическое усиление, морская Арктика, температура воздуха, морской лёд

DOI: 10.31857/S2076673424010077

ВВЕДЕНИЕ

Арктическое усиление (далее — АУ) потепления — превышение роста приповерхностной температуры воздуха в Арктике над ростом температуры в неарктических широтах — фундаментальная особенность климата в периоды потепления. АУ подтверждается палеоклиматическими данными (Miller et al., 2010), современными наблюдениями (Serreze, Francis, 2006; Векругаев et al., 2010; Мохов, 2015) и модельными прогнозами будущего климата (IPCC, 2013), хотя модели в среднем показывают более слабое АУ по сравнению с наблюдениями.

Несмотря на широкий спектр проявлений АУ, всё ещё отсутствует консенсус относительно того, какие физические механизмы наиболее важны в его возникновении (Serreze, Barry, 2011; Henderson et al., 2021; Previdi et al., 2021; Latonin et al., 2022). Первой была названа обратная связь альbedo морского ледяного покрова, в результате которой начальное потепление уменьшает площадь морского льда и снежного покрова, что увеличивает поглощение солнечной радиации и ещё больше ускоряет потепление и уменьшение альbedo. Было подтверждено анализом наблюдений (Векругаев et al., 2010; Screen, Simmonds, 2010; Zhang et al., 2018; Hwang et al., 2018; Cai et al., 2021) и с помощью моделей (Budyko, 1969; Sellers, 1969; Holland, Bitz, 2003; Winton, 2006; Байдин, Мелешко, 2014), что эти обратные связи вызывают АУ. Обратные связи с альbedo активны только при наличии солнечного света, что

бывает в Арктике в конце весны и летом. Однако летом АУ отсутствует и наиболее выражено осенью и зимой (Previdi et al., 2021), когда тепло, затраченное на таяние снега и льда и поглощённое океаном в конце весны и летом, отдаётся из океана в атмосферу при охлаждении воды и нарастании льда. Ожидается, что в условиях потепления климата амплитуда этого сезонного цикла увеличится, что означает большее поглощение тепла океаном весной и летом и большую потерю тепла океаном осенью и зимой (Carton et al., 2015). Считается, что усиленный приток тепла из океана в атмосферу осенью и зимой имеет первостепенное значение для АУ (Screen, Simmonds, 2010; Dai, 2021). Однако АУ присутствует в климатических моделях при отключении обратной связи с альbedo (Алексеев и др., 1990; Alexeev et al., 2005; Graverson, Wang, 2009). Это указывает на то, что и другие процессы также могут приводить к АУ при отсутствии каких-либо изменений альbedo.

В статье представлены результаты количественной оценки связи летнего сокращения ледовитости и осенне-зимнего восстановления ледяного покрова с ростом приповерхностной температуры воздуха в морской Арктике по данным наблюдений за морским льдом и температурой воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использована среднемесячная приповерхностная температура воздуха

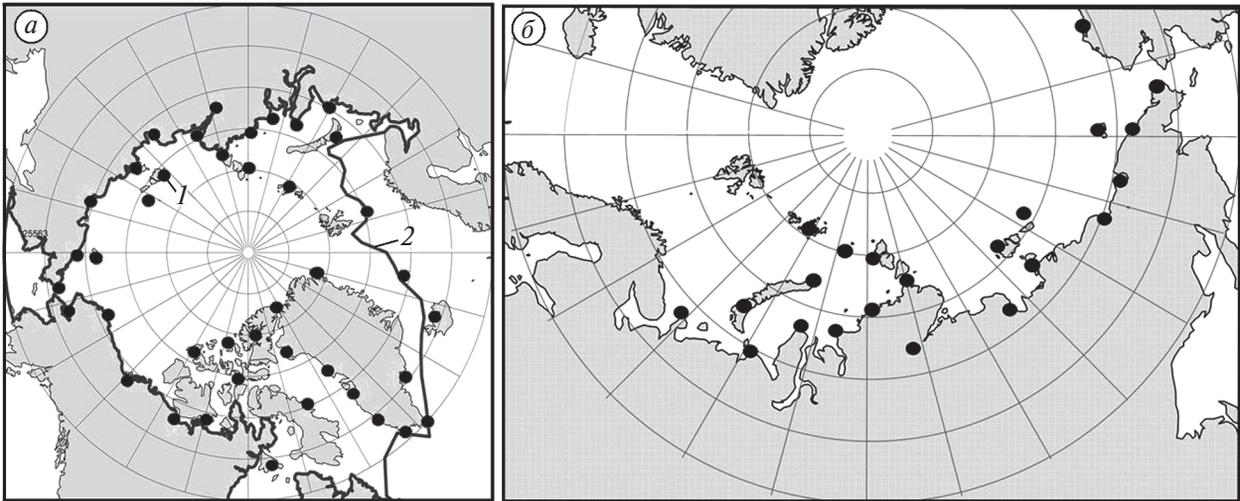


Рис. 1. Метеорологические станции на островах и побережье Северного Ледовитого океана и арктических морей Северного морского пути: в Северном Ледовитом океане (а); в арктических морях Северного морского пути (б). Точки — станции, синяя линия — граница наибольшего зимнего распространения морского льда в Арктике.

Fig. 1. Meteorological stations on the islands and coast of the Arctic Ocean and the Arctic seas of the Northern Sea Route: in the Arctic Ocean (a); in the Arctic seas of the Northern Sea Route (b). The dots are stations; blue line — the boundary of the largest winter extent of sea ice in the Arctic.

(далее — ПТВ) по данным наблюдений на 41 станции в морской Арктике (рис. 1) и данные о среднемесечной площади, покрытой морским льдом (ледовитость) в Северном Ледовитом океане (далее — СЛО) и арктических морях, по которым проходит Северный морской путь.

Данные о ледовитости подготовлены в ААНИИ и размещены на сайте <http://www.aari.ru/datasets>. Рассматривались ежегодные (g) междумесячные (m) изменения (d) ледовитости S_{gm} : $dS_{gm} = S_{gm} - S_{g(m-1)}$ и температуры T_{gm} : $dT_{gm} = T_{gm} - T_{g(m-1)}$, где $m = 1, \dots, 12$ месяцы; $g = 1989-2020$ гг. При $m = 1$ вместо $g(m-1)$ принимается $(g-1)12$.

Многолетние ряды S_{gm} , T_{gm} , dS_{gm} , dT_{gm} — объекты дальнейшего статистического анализа. Рассчитывались коэффициенты линейного тренда (a_S , a_T , a_{dS} , a_{dT}) рядов S_g , T_g , dS_g , dT_g ; коэффициенты корреляции $r(dT \cdot dS)$ между рядами dS_g и dT_g ; коэффициенты регрессии $rg(dT/dS) = r(dT \cdot dS) \cdot (\sigma_{dT}/\sigma_{dS})$, где σ — среднее квадратичное отклонение соответствующего ряда. Расчёты выполнялись для каждого месяца за 1989–2020 гг.

Полученные значения статистических характеристик служили основой для оценки чувствительности междумесячных изменений температуры воздуха к междумесячным изменениям ледовитости. Чувствительность (a) определяется двумя способами — как коэффициент регрессии $a_{rg} = rg(dT/dS)$ и как отношение коэффициентов тренда $a_{tr} = a_{dT}/a_{dS}$. Соответственно, оценка вклада (W) тренда междумесячных разностей

ледовитости (a_{dS}) в тренд межгодовых изменений температуры (a_T) рассчитывалась по формулам

$$W_{rg} = a_{rg} \cdot a_{dS}; \quad (1)$$

$$W_{tr} = a_{tr} \cdot a_{dS}. \quad (2)$$

В формуле (2) использование коэффициента a_{dS} как множителя и как частного в определении коэффициента чувствительности a_{tr} необходимо для обеспечения размерности W_{tr} [$^{\circ}\text{C}/\text{год}$]. Оценка вклада W по отношению к “невозмущённому” изменению (тренду) температуры определяется как

$$W'(\%) = \left(\frac{W}{a_{Tn}} \right) \cdot 100, \quad (3)$$

где $a_{Tn} = (a_T - W)$ — “невозмущённый” тренд, $W = W_{rg}$ или W_{tr} .

На основе рядов междумесячных разностей dT_{mg} и dS_{mg} , $m = 1, \dots, 12$ месяцы; $g = 1989-2020$ гг., для каждого месяца выполнялись расчёты оценки вклада по формуле (1), если коэффициент корреляции $r(dT \cdot dS)_m$ положителен, и по формуле (2), если коэффициенты тренда a_{dT} и a_{dS} имеют одинаковый знак. Оба условия предполагают наличие в рядах dT_{mg} и dS_{mg} связи изменений ледовитости и изменений температуры. Расчёты выполнялись по данным за 1989–2020 гг., когда потепление в Арктике становится заметным. Результаты расчётов занесены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Характеристики изменений среднемесячных значений температуры воздуха и ледовитости в Северном Ледовитом океане и оценки вклада сокращения ледовитости в потепление в 1989–2020 гг.

Месяц	$M(T)$	a_T	a_S	a_{dT}	a_{dS}	$M(dT)$	$M(dS)$	$r(dT \cdot dS)$	$W'_{tr, \%}$
1	-22.54	0.1596	-26.5	0.0200	11.2	-2.76	415.5	-0.23	14
2	-22.94	0.1343	-23.2	-0.0253	3.3	-0.41	113.4	-0.19	—
3	-20.92	0.0984	-16.8	-0.0359	6.4	2.03	73.2	-0.31	—
4	-14.25	0.0900	-13.2	0.0006	3.5	6.67	-19.9	0.001	—
5	-5.05	0.0597	-20.2	-0.0393	-6.9	9.20	-299.8	0.03	-40
6	2.76	0.0524	-43.6	-0.0074	-23.5	7.80	-884.0	0.01	-12
7	6.32	0.0399	-75.5	-0.0124	-31.9	3.56	-2093.6	0.11	-24
8	5.36	0.0556	-89.9	0.0156	-14.4	-0.96	-2142.0	-0.20	—
9	0.90	0.0722	-100.1	0.0166	-10.2	-4.47	-810.8	-0.21	—
10	-6.88	0.1563	-106.6	0.0842	-6.5	-7.77	1828.7	-0.21	—
11	-14.69	0.1628	-57.2	0.0065	49.4	-7.81	2371.5	-0.33	4
12	-19.68	0.1517	-35.6	-0.0111	21.5	-4.99	1403.6	-0.33	—

$M(T)$ — средняя температура; a_T — коэффициент тренда температуры; a_S — коэффициент тренда ледовитости; a_{dT} — коэффициент тренда межмесячных разностей температуры; a_{dS} — коэффициент тренда межмесячных разностей ледовитости; $M(dT)$ — среднее значение межмесячных разностей температуры; $M(dS)$ — среднее значение межмесячных разностей ледовитости; $r(dT \cdot dS)$ — коэффициент корреляции межмесячных разностей температуры и ледовитости; $W'_{tr, \%}$ — относительная оценка вклада сокращения ледовитости в “невозмущённый” тренд температуры по формуле (3). Жирным шрифтом выделены значения, значимые на 95% уровне.

Таблица 2. Характеристики изменений среднемесячных значений температуры воздуха и ледовитости в арктических морях Северного морского пути и оценки вклада сокращения ледовитости в потепление над морями в 1989–2020 гг.

Месяц	$M(T)$	a_T	a_S	a_{dT}	a_{dS}	$M(dT)$	$M(dS)$	$r(dT \cdot dS)$	$W'_{rg, \%}$	$W'_{tr, \%}$
1	-23.74**	0.2144**	-1.63**	0.0199**	5.32**	-2.70**	57.2**	-0.04**	—	10
2	-23.93	0.1568	-0.88	-0.0257	0.52	-0.21	3.4	-0.21	—	—
3	-21.22	0.1095	-0.32	-0.0460	0.56	2.73	6.1	-0.40	—	—
4	-14.99	0.1435	0.002	0.0342	0.33	6.22	-0.8	-0.41	—	—
5	-5.73	0.0590	-2.26	-0.0842	-2.27	9.25	-37.5	0.55	-52	-59
6	1.90*	0.0704*	-16.47*	-0.0240*	-13.31*	7.66*	-262.6*	0.22*	-24*	-25
7	5.18	0.0395	-35.48	-0.0201	-22.22	3.36	-761.4	0.21	-34	-34
8	4.74	0.0615	-40.64	0.0220	-5.15	-0.43	-996.3	-0.50	—	—
9	1.51	0.0983	-39.79	0.0372**	-2.10**	-3.27**	-343.5**	-0.07	—	—
10	-6.30	0.2204	-57.77	0.1221	-17.97	-7.81	874.6	-0.44	—	—
11	-15.08	0.2486	-21.91	0.0282	35.85	-8.77	1061.5	-0.27	—	13
12	-20.82	0.2057	-7.76	-0.0436	14.15	-5.72	355.7	-0.48	—	—

$M(T)$ — средняя температура; a_T — коэффициент тренда температуры; a_S — коэффициент тренда ледовитости; a_{dT} — коэффициент тренда межмесячных разностей температуры; a_{dS} — коэффициент тренда межмесячных разностей ледовитости; $M(dT)$ — среднее значение межмесячных разностей температуры; $M(dS)$ — среднее значение межмесячных разностей ледовитости; $r(dT \cdot dS)$ — коэффициент корреляции межмесячных разностей температуры и ледовитости; $W'_{rg, \%}$ — относительная оценка вклада сокращения ледовитости в “невозмущённый” тренд температуры по формуле (2); $W'_{tr, \%}$ — относительная оценка вклада сокращения ледовитости в “невозмущённый” тренд температуры по формуле (3).

*расчёт за 1993–2020 гг.; **расчёт за 1989–2018 гг. Исключались пары (dS, dT) , в которых большому приращению T соответствовало большое сокращение S , что означает влияние аномального притока тепла или случаи, когда при большом сокращении S отсутствует изменение T , означающее влияние динамического фактора (вынос льда). Жирным шрифтом выделены значимые на 95% уровне значения.

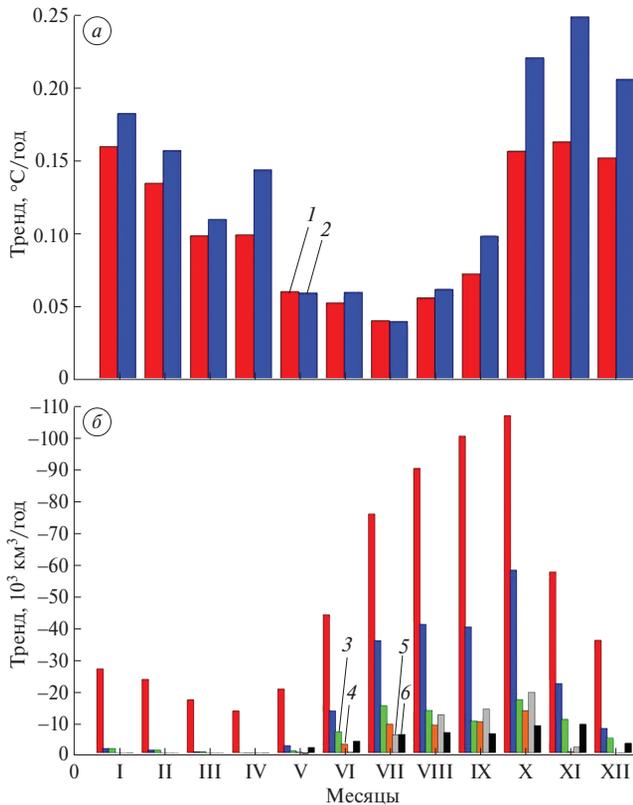


Рис. 2. Коэффициенты тренда среднемесячной температуры воздуха (а) и ледовитости (б) в Арктике: 1 — Северный Ледовитый океан; 2 — моря Северного морского пути (3 — Карское, 4 — Лаптевых, 5 — Восточно-Сибирское, 6 — Чукотское).

Fig. 2. Trend coefficients in average monthly air temperature (а) and ice coverage (б) in the maritime Arctic: 1 — Arctic Ocean; 2 — seas of the Northern Sea Route (3 — Kara, 4 — Laptev, 5 — East Siberian, 6 — Chukchi).

Чтобы проверить репрезентативность температуры воздуха на береговых станциях, для акватории моря были использованы сеточные данные о температуре воздуха на акватории по данным реанализа ERA5 за тот же период. По этим данным выполнены сравнение средней температуры над морем со средней температурой по береговым станциям и расчёты оценок, подобных рассчитанным по береговым станциям. Результаты сравнения представлены в разделе “Обсуждение и выводы”.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Средние значения разностей ледовитости от месяца к месяцу $M(dS)$ (см. табл. 1 и 2) отрицательны с апреля по сентябрь в результате сезонного сокращения ледовитости и положительны с октября по март при восстановлении ледяного покрова. Положительные средние значения

междумесечных разностей температуры воздуха $M(dT)$ в марте — июле соответствуют сезонному повышению температуры воздуха, а отрицательные с августа по февраль — сезонному понижению.

На рис. 2 показаны диаграммы с коэффициентами тренда межгодовых изменений температуры воздуха и ледовитости в рассматриваемых районах Арктики за 1989–2020 гг., а в табл. 1 и 2 занесены численные значения коэффициентов тренда межгодовых и междумесечных изменений температуры и ледовитости за эти годы. Коэффициенты тренда межгодовых изменений ледовитости во все месяцы отрицательны, кроме отдельных незначимых близких к нулю трендов в арктических морях с февраля по апрель. Минимальные по абсолютной величине коэффициенты тренда приходятся на апрель, а максимальные — на октябрь. Коэффициенты тренда многолетних изменений температуры воздуха положительны во все месяцы, максимальны в холодную часть года с октября по апрель (максимум в ноябре) и минимальны с мая по август (минимум в июле).

Коэффициенты тренда многолетних рядов междумесечных изменений ледовитости положительны с ноября по апрель, т.е. в период сезонного роста ледовитости (максимум в ноябре). Коэффициенты тренда многолетних рядов междумесечных изменений температуры над рассматриваемыми районами морской Арктики отрицательны в мае — июле, положительны в августе — ноябре, январе, апреле и отрицательны в феврале, марте и декабре. Замедление междумесечного роста температуры с мая по июль (отрицательные значения коэффициентов тренда междумесечных изменений температуры) совпадает по знаку с отрицательными значениями коэффициентов междумесечного сокращения ледовитости, что может свидетельствовать об охлаждающем влиянии растущего расхода тепла на таяние снега и льда и на прогрев верхнего освобождающегося ото льда слоя воды. Положительная корреляция междумесечных изменений ледовитости и температуры воздуха в мае — июле (рис. 3; см. табл. 1–2) также подтверждает связь между растущими отрицательными междумесечными разностями ледовитости и убывающими разностями температуры воздуха в эти месяцы. Коэффициенты малы, но имеют одинаковые знаки с мая по июль в обеих рассматриваемых акваториях. Вероятность случайного совпадения между знаками коэффициентов тренда и между знаками коэффициентов корреляции во всех трёх месяцах и в обеих акваториях составляет 0.0156.

Положительные коэффициенты тренда междумесечных разностей температуры и отрицательные коэффициенты тренда междумесечных разностей ледовитости в августе — октябре могут означать, что при продолжении таяния льда в основном за счёт накопленного тепла в верхнем слое моря

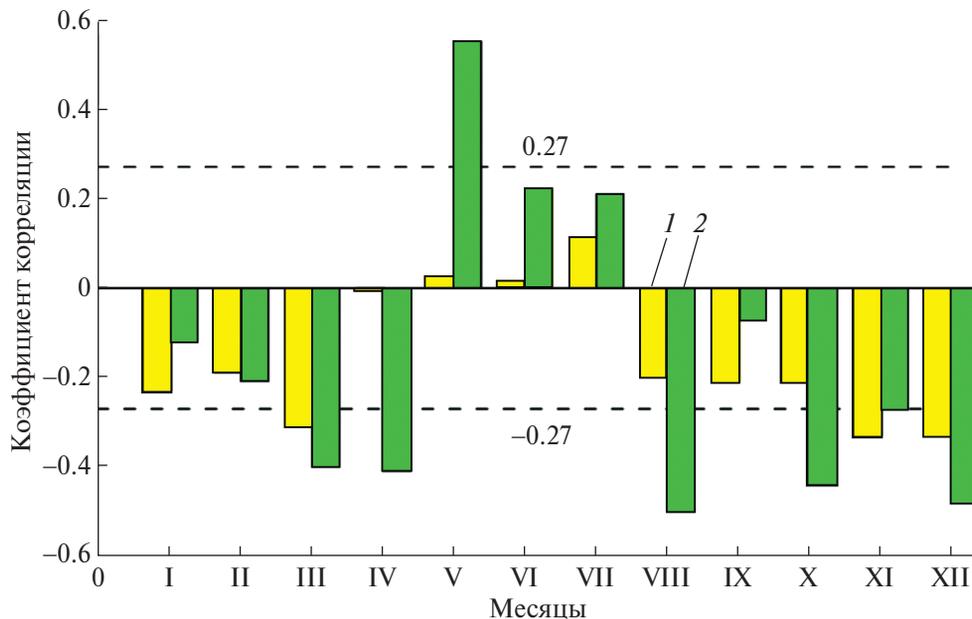


Рис. 3. Коэффициенты корреляции между разностями от месяца к месяцу ледовитости и температуры воздуха в Северном Ледовитом океане и морях Северного морского пути: 1 — Северный Ледовитый океан; 2 — моря Северного морского пути.
Fig. 3. Correlation coefficients between differences from month to month of ice coverage and air temperature in the Arctic Ocean and the seas of the Northern Sea Route: 1 — Arctic Ocean; 2 — seas of the Northern Sea Route.

происходит и приток тепла в атмосферу из моря вместе с ростом притока извне; разделить их влияние на тренд температуры по формулам (1)–(3) не представляется возможным.

Оценки возможного влияния сокращения ледовитости на тренд температуры в период таяния снега и льда с мая по июль по формулам (1)–(3) показали, что тренд потепления в эти месяцы может уменьшиться в среднем на 25% над акваторией Северного Ледовитого океана (далее — СЛО) и на 38% над морями Северного морского пути (далее — СМП). Оценки усиления тренда температуры в осенне-зимние месяцы затруднены из-за влияния внешнего притока тепла. Лишь в ноябре и январе обнаруживается замедление понижения температуры воздуха от октября к ноябрю и от декабря к январю (положительные коэффициенты тренда межмесячных изменений температуры) при положительном тренде приращений ледовитости. Оценки возможного вклада увеличивающегося восстановления ледяного покрова в эти месяцы в тренд температуры воздуха таковы: над СЛО 4–14%, а над морями СМП 13–10%.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Получены оценки связи летнего сокращения и осенне-зимнего восстановления ледяного покрова с ростом приповерхностной температуры воздуха в морской Арктике по данным наблюдений за морским льдом и температурой воздуха. Используются среднемесячная приповерхностная

температура воздуха на береговых и островных метеостанциях в морской Арктике и данные о среднемесячной площади, покрытой морским льдом (ледовитости), в СЛО и арктических морях, по которым проходит Северный морской путь, за 1989–2020 гг.

Температура воздуха на прибрежных и островных станциях используется при прогнозировании ледовых условий в арктических морях (Визе, 1944; Гудкович и др., 1972). Сравнение средней температуры воздуха на станциях, расположенных на побережье и островах, с температурой, рассчитанной по данным реанализа ERA5 над акваторией моря, показало (рис. 4, а), что изменения средней температуры близки во все месяцы — более всего в холодную часть года (с октября по апрель) и несколько меньше — с июня по сентябрь. Коэффициенты корреляции между рядами разностей температур по ERA5 и по станциям с декабря по май для Карского, Лаптевых, Чукотского морей превышают 0.92, в июне составляют 0.84–0.92, в июле 0.58–0.83, в августе — октябре 0.72–0.89, в ноябре 0.88–0.95. В Восточно-Сибирском море расхождение между оценками по ERA5 и по станциям больше из-за малого числа станций при значительном протяжении побережья. Коэффициенты корреляции здесь 0.87–0.95 с декабря по май и 0.53 в июле.

Оценки трендов приращений, определённых по данным ERA5 и по станциям (см. рис. 4, б), для четырёх арктических морей близки по величине и совпадают по знаку в 40 случаях из 48. В мае

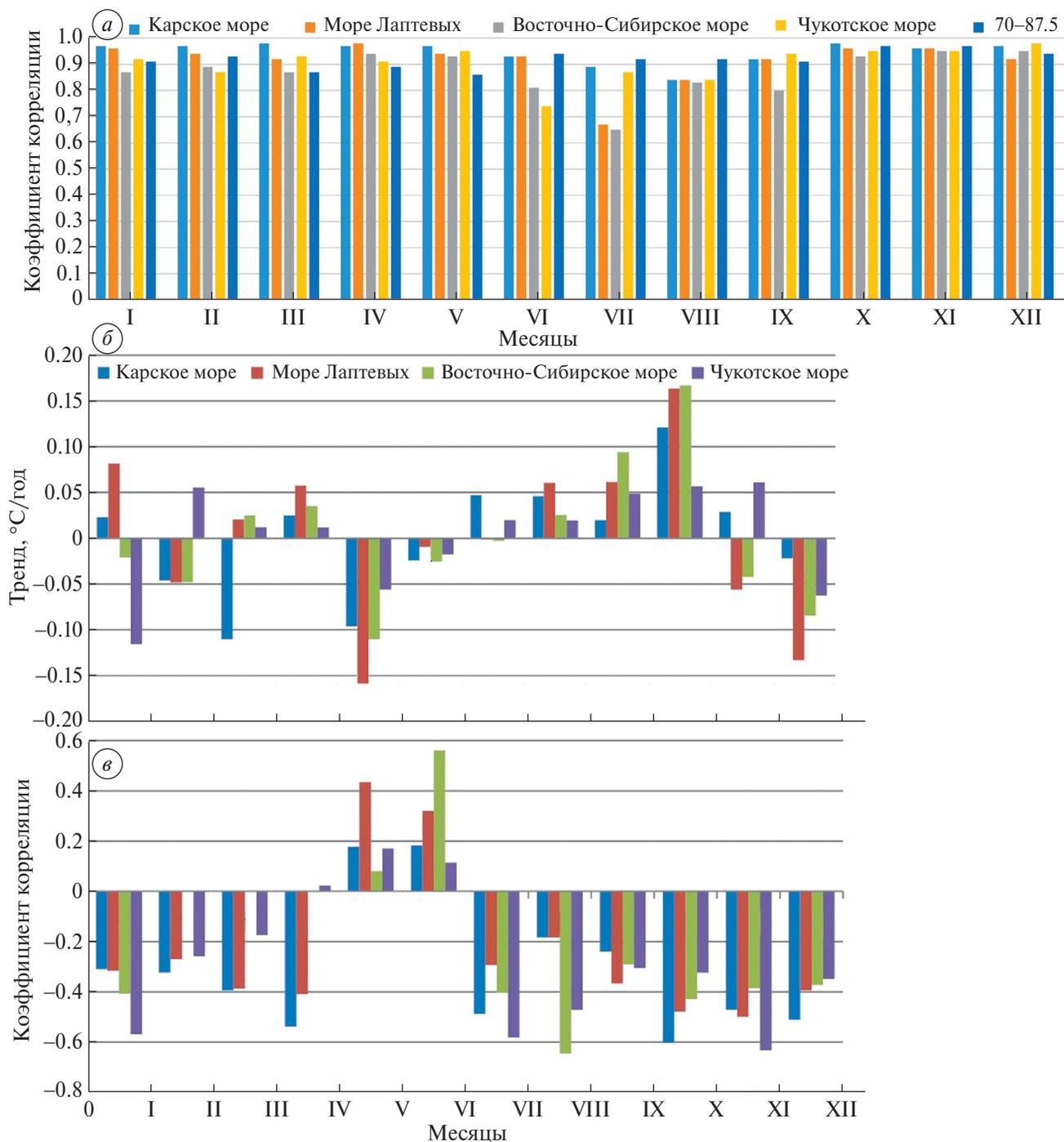


Рис. 4. Характеристики изменчивости температуры воздуха над акваторией морей Северного морского пути по реанализу ERA5 и корреляции между приращениями температуры и ледовитости для сравнения с расчётами, использующими температуру на метеостанциях: *а* – коэффициенты корреляции между средними температурами; *б* – коэффициенты тренда междумесечных приращений температуры по ERA5; *в* – коэффициенты корреляции между приращениями температуры по ERA5 и ледовитости.

Fig. 4. Characteristics of air temperature variability over the water areas of the seas of the NSR according to the ERA5 reanalysis and the correlation between increments of temperature and ice coverage for comparison with calculations using temperature at meteorological stations: *a* – correlation coefficients between average temperatures; *б* – trend coefficients of intermonthly temperature increments according to ERA5; *в* – correlation coefficients between temperature increments according to ERA5 and ice cover.

Таблица 3. Относительные оценки вклада (%) сокращения ледовитости (W') в “невозмущённый” тренд температуры воздуха в разные месяцы, оценённый по формулам (1) и (2) с использованием данных о температуре из реанализа ERA5 и по береговым метеостанциям

Акватория	$W'rg_{05}$	$W'rg_{06}$	$W'tr_{05}$	$W'tr_{06}$	$W'tr_{07}$	$W'tr_{11}$	$W'tr_{01}$
Карское море (ERA5)	-31	-36	-66	-49	N	12	9
Море Лаптевых (ERA5)	-38	-41	-80	-23	-3	N	N
Восточно-Сибирское море (ERA5)	N	-54	-76	-7	-30	N	N
Чукотское море (ERA5)	-45	-16	-55	N	N	N	N
Карское море (станции)	-29	-3	-59	-15	-20	2	5
Море Лаптевых (станции)	-25	-2	-69	N	-86	3	N
Восточно-Сибирское море (станции)	N	-16	-66	N	-44	23	N
Чукотское море (станции)	-50	-47	-53	-44	N	N	N
Среднее по морям: ERA5/ станции	-38/-35	-37/-17	-69/-62	-26/-30	-16/-50	-12/-9	-9/-5

N – оценка отсутствует.

совпадение стопроцентное, при этом отрицательные тренды приращений температуры соответствуют отрицательным трендам межмесячного сокращения ледовитости. В июне, по данным ERA5, в рассматриваемых морях (кроме Чукотского) тренды приращений температуры отрицательны и соответствуют таковым для приращений ледовитости. В июле знаки трендов приращений ледовитости и температуры по данным станций совпадают в трёх морях, а по поданным ERA5 отрицательные тренды соответствуют таковым для ледовитости в двух морях.

Положительная корреляция межмесячных изменений ледовитости и температуры воздуха по данным станций в мае — июле подтверждает связь между растущими отрицательными межмесячными разностями ледовитости и убывающими положительными разностями температуры воздуха в эти месяцы. В остальные месяцы корреляция отрицательна из-за влияния притока тепла извне, маскирующего влияние притока из моря. По данным о температуре воздуха над морями по ERA5, корреляция между приращением ледовитости и температурой воздуха в мае и июне (см. рис. 4, в), а в остальные месяцы отрицательна.

Анализ с использованием температуры воздуха по данным реанализа ERA5 и по береговым станциям (табл. 3) показал на возможное отрицательное влияние сокращения ледовитости в период таяния в мае — июле и положительное влияние осенне-зимнего восстановления ледяного покрова на тренд температуры воздуха. В мае

оценки возможного влияния по обоим наборам данных о температуре воздуха близки между собой (от -38 до -35% по формуле (1) и от -69 до -62% по формуле (2)). Июньские оценки: от -37 до -17% по формуле (1) и от -26 до -30% по формуле (2). В остальные месяцы расчёты были возможны только по формуле (2). В июле оценки составили от -16 до -56%, в ноябре 12–9%, в январе 9–5%.

Несмотря на отличия полученных оценок возможного влияния сокращения ледовитости на тренд температуры воздуха в Арктике по разным наборам данных о температуре воздуха, все оценки подтверждают возможное отрицательное влияние на тренд температуры сокращения ледовитости в период весенне-летнего таяния в мае — июле. В период восстановления ледяного покрова в ноябре — марте влияние ледообразования и охлаждения воды на тренд температуры обнаружить с помощью использования формул (1)–(3) удалось лишь в ноябре и январе из-за увеличения притока тепла с атмосферной циркуляцией в осенне-зимний сезон, маскирующего влияние притока из моря.

Благодарности. Статья подготовлена при поддержке проекта РФФ 23-47-10003. Авторы благодарят Н. И. Глок за помощь в подготовке рукописи к представлению в журнал “Лёд и Снег”.

Acknowledgments. The article was prepared with the support of the Russian Science Foundation project 23-47-10003. The authors thank N. I. Glock for help in preparing the manuscript for submission to the Ice and Snow magazine.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев Г. В., Подгорный И. А., Священников П. Н.* Адвективно-радиационные колебания климата // ДАН СССР. 1990. Т. 315. № 4. С. 824–827.
- Байдин А. В., Мелешко В. П.* Реакция атмосферы высоких и умеренных широт на сокращение площади морского льда и повышение температуры поверхности океанов // Метеорология и гидрология. 2014. № 6. С. 5–8.
- Визе В. Ю.* Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. М.: Изд-во Главсевморпути, 1944. 273 с.
- Гудкович З. М., Кириллов А. А., Ковалёв Е. Г.* Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометиздат, 1972. 348 с.
- Мохов И. И.* Современные изменения климата в Арктике // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–484.
- Alexeev V. A., Langen P. L., Bates J. R.* Polar amplification of surface warming on an aquaplanet in “ghost forcing” experiments without sea ice feedbacks // Climate Dynamics. 2005. V. 24. P. 655–666. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0018-3>
- Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A.* Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming // Journ. of Climate. 2010. V. 23. № 14. P. 3888–3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>
- Budyko M. I.* The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth // Tellus. 1969. V. 212. P. 611–619.
- Cai Q., Wang J., Beletsky D., Overland J., Ikeda M., Wan L.* Accelerated decline of summer Arctic sea ice during 1850–2017 and the amplified Arctic warming during the recent decades // Environ. Research Letters. 2021. V. 16. № 3. 34015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdb5f>
- Carton J. A., Ding Y., Arrigo K. R.* The seasonal cycle of the Arctic Ocean under climate change // Geophys. Research Letters. 2015. V. 42. № 18. P. 7681–7686. <https://doi.org/10.1002/2015GL064514>
- Dai H.* Roles of surface albedo, surface temperature and carbon dioxide in the seasonal variation of Arctic amplification // Geophys. Research Letters. 2021. V. 48. № 4. e2020GL090301. <https://doi.org/10.1029/2020GL090301>
- Graversen R. G., Wang M.* Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo // Climate Dynamics. 2009. V. 33. P. 629–643.
- Henderson G. R., Barrett B. S., Wachowicz L. J., Mattingly K. S., Preece J. R., Mote T. L.* Local and Remote Atmospheric Circulation Drivers of Arctic Change: A Review // Front. Earth Sci. 2021. V. 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.709896>
- Holland M. M., Bitz C. M.* Polar amplification of climate change in coupled models // Climate Dynamics. 2003. V. 21. P. 221–232. <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0332-6>
- Hwang J., Choi. Y-S., Kim W., Su H., Jiang J.* Observational estimation of radiative feedback to surface air temperature over Northern High Latitudes // Climate Dynamics. 2018. V. 50. P. 615–628. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3629-6>
- IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- Latonin M. M., Bashmachnikov I. L., Bobylev L. P.* Bjerknnes compensation mechanism as a possible trigger of the low-frequency variability of Arctic amplification // Russian Journ. of Earth Sciences. 2022. V. 22. № 6. ES6001. <https://doi.org/10.2205/2022ES000820>
- Miller G. H., Alley R. B., Brigham-Grette J., Fitzpatrick J. J., Polyak L., Serreze M. C., White J. W.C.* Arctic amplification: Can the past constrain the future? // Quaternary Science Review. 2010. V. 29. № 15–16. P. 1779–1790. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.02.008>
- Previdi M., Smith K. L., Polvani L. M.* Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. № 9. 93003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
- Screen J. A., Simmonds I.* The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // Nature. 2010. V. 464. № 7293. P. 1334–1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>
- Sellers W. D.* A global climatic model based on energy balance of the Earth-atmosphere system // Journ. of Applied Meteorology. 1969. V. 8. P. 392–400. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2)
- Serreze M. C., Barry R. G.* Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global Planetary Change. 2011. V. 77. P. 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
- Serreze M. C., Francis J. A.* The arctic amplification debate // Climate Change. 2006. V. 76. P. 241–264. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9017-y>
- Winton M.* Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? // Geophys. Research. Letters. 2006. V. 33. № 3. P. 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL025244>
- Zhang R., Wang H., Fu Q., Pendergrass A. G., Wang M., Yang Y., Ma P-L., Rasch P. J.* Local Radiative Feedbacks Over the Arctic Based on Observed Short-Term Climate Variations // Geophys. Research Letters. 2018. V. 45. № 11. P. 5761–5770. <https://doi.org/10.1029/2018GL077852>

REFERENCES

Citation: Alekseev G. V., Kharlanenkova N. E. Link between shrinking sea ice and rising air temperatures in the marine Arctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 096–105 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010077

On a relation between shrinking of sea ice coverage and climate warming in the marine Arctic

G. V. Alekseev^{a,#}, N. E. Kharlanenkova^a

^aArctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

[#]e-mail: alexgv@aari.ru

Received June 6, 2023; revised October 28, 2023; accepted March 31, 2024

Arctic amplification (AA) of the climate warming is understood as the excess of the surface air temperature rise in the Arctic over the same process in the non-Arctic latitudes, and it is a fundamental characteristic of the climate during periods of warming. The positive feedback between albedo and shrinking of the sea ice coverage has been identified as the first possible cause of AA. The article presents quantitative estimates of the relationship between the summer decrease and autumn-winter restoration of the ice coverage with the rise of the surface air temperature in the marine Arctic based on data of observations. The mean monthly values of the temperature in the marine Arctic and the mean monthly values of areas covered by the sea ice in the Arctic Ocean and the Arctic seas for the period 1989–2020 were used. It has been found that the observed warming and the decrease of the ice coverage are accompanied by a growth of inter-monthly changes in the coverage and the same in the air temperature. Negative trends in increments of the ice coverage in May–July is indicative of a long-term growth in inter-monthly shrinkage of the ice coverage due to increasing melting, while negative trends in increments of the temperature in the same months is suggestive of a slowdown in the temperature rise from month to month, presumably due to the increasing heat consumption for the snow and ice melting and the water heating. The positive correlation confirms the relation between growing negative inter-monthly differences in the ice coverage and decreasing positive differences in the air temperature during these months. Based on that we determined a sensitivity of the inter-monthly increments of the temperature to the increments of the ice coverage, which was used to estimate the weakening of the positive air temperature trend in May–July over the Arctic Ocean and over the seas of the Northern Sea Route (NSR). Estimating of the relationship between month-to-month changes in temperature and ice coverage in the autumn-winter months meet difficulties due to the strong influence of external heat influx. Only in November and January a slowdown in the air temperature drop from October to November and from December to January had been revealed, with a positive trend in the ice coverage increments.

Keywords: Arctic amplification, maritime Arctic, air temperature, sea ice

Bajdin A. V., Meleshko V. P. Response of the atmosphere at high and middle latitudes to the reduction of sea ice area and the rise of sea surface temperature. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2014, 6: 5–8 [In Russian].

Vize V. Yu. Fundamentals of long-term ice forecasts for the Arctic seas. Moscow: Glavsevmorput, 1944: 273 p. [In Russian].

Gudkovich Z. M., Kirillov A. A., Kovalev E. G. Fundamentals of long-term ice forecasts for the Arctic seas. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1972: 348 p. [In Russian].

Mohov I. I. Modern climate changes in the Arctic. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. Bulletin of the Russian

Academy of Sciences. 2015, 85 (5–6): 478–484 [in Russian].

Alekseev V. A., Langen P. L., Bates J. R. Polar amplification of surface warming on an aquaplanet in “ghost forcing” experiments without sea ice feedbacks. *Climate Dynamics*. 2005, 24: 655–666. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0018-3>

Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alekseev V. A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming. *Journ. of Climate*. 2010, 23 (14): 3888–3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>

- Budyko M. I.* The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*. 1969, 212: 611–619.
- Cai Q., Wang J., Beletsky D., Overland J., Ikeda M., Wan L.* Accelerated decline of summer Arctic sea ice during 1850–2017 and the amplified Arctic warming during the recent decades. *Environ. Research Letters*. 2021, 16 (3): 34015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdb5f>
- Carton J. A., Ding Y., Arrigo K. R.* The seasonal cycle of the Arctic Ocean under climate change. *Geophys. Research Letters*. 2015, 42 (18): 7681–7686. <https://doi.org/10.1002/2015GL064514>
- Dai H.* Roles of surface albedo, surface temperature and carbon dioxide in the seasonal variation of Arctic amplification. *Geophys. Research Letters*. 2021, 48 (4): e2020GL090301. <https://doi.org/10.1029/2020GL090301>
- Graversen R. G., Wang M.* Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo. *Climate Dynamics*. 2009, 33: 629–643.
- Henderson G. R., Barrett B. S., Wachowicz L. J., Mattingly K. S., Preece J. R., Mote T. L.* Local and Remote Atmospheric Circulation Drivers of Arctic Change: A Review. *Front. Earth Science*. 2021: 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.709896>
- Holland M. M., Bitz C. M.* Polar amplification of climate change in coupled models. *Climate Dynamics*. 2003, 21: 221–232. <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0332-6>
- Hwang J., Choi Y.-S., Kim W., Su H., Jiang J.* Observational estimation of radiative feedback to surface air temperature over Northern High Latitudes. *Climate Dynamics*. 2018, 50: 615–628. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-362>
- IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
- Latonin M. M., Bashmachnikov I. L., Bobylev L. P.* Bjerknnes compensation mechanism as a possible trigger of the low-frequency variability of Arctic amplification. *Russian Journ. of Earth Sciences*. 2022, 22 (6): ES6001. <https://doi.org/10.2205/2022ES000820>
- Miller G. H., Alley R. B., Brigham-Grette J., Fitzpatrick J. J., Polyak L., Serreze M. C., White J. W. C.* Arctic amplification: Can the past constrain the future? *Quaternary Science Review*. 2010, 29 (15–16): 1779–1790. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.02.008>
- Previdi M., Smith K. L., Polvani L. M.* Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. *Environ. Research Letters*. 2021, 16 (9): 93003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
- Screen J. A., Simmonds I.* The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*. 2010, 464 (7293): 1334–1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>
- Sellers W. D.* A global climatic model based on energy balance of the Earth-atmosphere system. *Journ. of Applied Meteorology*. 1969, 8: 392–400. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2)
- Serreze M. C., Barry R. G.* Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global Planetary Change*. 2011, 77: 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
- Serreze M. C., Francis J. A.* The arctic amplification debate. *Climate Change*. 2006, 76: 241–264. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9017-y>
- Winton M.* Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? *Geophys. Research Letters*. 2006, 33 (3): 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL025244>
- Zhang R., Wang H., Fu Q., Pendergrass A. G., Wang M., Yang Y., Ma P.-L., Rasch P. J.* Local Radiative Feedbacks Over the Arctic Based on Observed Short-Term Climate Variations. *Geophys. Research Letters*. 2018, 45 (11): 5761–5770. <https://doi.org/10.1029/2018GL077852>