

## ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.583.1: 551.46.06 (268.52)

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-125-147

### КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КАРСКОГО МОРЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 40 ЛЕТ

И.Д. РОСТОВ<sup>1</sup>\*, Е.В. ДМИТРИЕВА<sup>1</sup>, Н.И. РУДЫХ<sup>1</sup>, А.А. ВОРОНЦОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> — ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> — ФГБУН Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической  
информации – Мировой центр данных, Обнинск, Россия

\*rostov@poi.dvo.ru

### CLIMATIC CHANGES OF THERMAL CONDITION IN THE KARA SEA AT LAST 40 YEARS

I.D. ROSTOV<sup>1</sup>\*, E.V. DMITRIEVA<sup>1</sup>, N.I. RUDYKH<sup>1</sup>, A.A. VORONTSOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> — V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of  
Sciences, Vladivostok, Russia

<sup>2</sup> — All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Centre,  
Obninsk, Russia

\*rostov@poi.dvo.ru

Received April, 10, 2019

Accepted June, 4, 2019

**Keywords:** climate indices, Kara Sea, thermal conditions, year-to-year variability.

#### Summary

The paper discusses air ( $T_a$ ) and sea surface temperature (SST) year-to-year variability due to warming of the Kara Sea, using the data from regular observations at the meteorological stations Roshydromet (GMS) in 1978–2017, NOAA optimum interpolation and reanalysis data. We use the methods of cluster, correlation analysis and Empirical Orthogonal Functions (EOF). We investigate possible cause and effect relationships of these changes with the variations of the wind field components, climatic indices and the sea ice concentration field. The cluster analysis of the three main EOF components has allowed us to identify four areas on the basis of the nature of changes of the water temperature anomalies field. The climatic changes in these areas, in the coastal and island zones of the Kara Sea have manifested themselves in the steady increase of the annual air temperature at GMS from 0,47–0,77 °C/10 years on the southwest coast to 1,33–1,49 °C/10 years in the north of the sea. This is equivalent to warming from 1,9 to 6,0 °C in the last 40 years. For the open sea the

**Citation:** Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Rudykh N.I., Vorontsov A.A. Climatic changes of thermal condition in the Kara sea at last 40 years. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 2: 125–147. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-125-147.

value of the  $T_a$  trend is about 1,22 °C/10 years, which corresponds to an increase in the average  $T_a$  by 4,9 °C in the last 40 years. This value is approximately 3 times greater than that for all the Northern hemisphere for the same period.

Annually, the maximal trend was observed in November and April mainly and exceeded 2–3 °C/10 years at some of the stations. We identify anomalously warm (2016 and 2012) and anomalously cold (1978, 1979, 1992 and 1998) years: the warmest year was 2012, the coldest — 1979. Positive SST trends were observed over all the sea area during the warm period of year (to 1 °C/10 years). SST increased to 2,4 °C, which is approximately 1,5 times greater than the corresponding SST values for the Northern hemisphere. The maximum SST trend (0,4 °C/10 years) was observed in the northwest and southwest parts of the sea. From June to August the trends of SST exceed the annual ones 1,5–2 times. Interannual SST and  $T_a$  variations are characterized by close correlation links. Until approximately 1998–2004 the warming was rather insignificant, and after that the growth rate of  $T_a$  and SST increased many fold. Apparently it indicates changes in the mode and the large-scale atmospheric circulation in the early 2000s. We also observed a trend of strengthening of the southern wind during the cold period of the year and the northern one — in the warm period (0,5–0,6 m/s in 40 years). It is shown that there is a close correlation between the  $T_a$  increase and the changes in the meridional component of the wind speed during the cold period of the year for all the sea areas. For the warm period it is statistically insignificant both for  $T_a$  and SST. For the cold season we observed a contribution of the large-scale mode of atmospheric circulation into the variability of  $V$  component of the wind speed. The contribution was expressed through the indices NAO, SCAND, Pol/EUR, AZOR, ISL and the differences of ISL-SIB. For the warm season this contribution is expressed through the NAO, SCAND and AO only. For the warm period we showed statistically significant correlation between the increase in SST,  $T_a$  and the processes parametrized by the AMO, EA/WR and AZOR indices. For the cold period the indices are AMO, Pol/Eur, SIB and ISL-SIB. The interannual variations of the sea ice concentration field are characterized by close correlation with  $T_a$  changes both in the annual cycle and during the periods of ice cover formation and evolution ( $R = -0,7... -0,9$ ). For these periods we showed statistically significant relationships between the first EOF mode fluctuations and two climatic indices — AMO ( $R = 0,5$ ) and Pol/Eur ( $R = 0,4$ ). The relationships between the temporary variability of the sea ice concentration and the wind field characteristics are weaker and statistically significant only for the meridional component of the wind speed ( $R = -0,4$ ).

Поступила 10 апреля 2019 г.

Принята к печати 4 июня 2019 г.

*Ключевые слова:* Карское море, климатические индексы, межгодовая изменчивость, термические условия.

По данным срочных наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета за 1978–2017 гг., данных оптимальной интерполяции и реанализа NOAA выполнен анализ межгодовой изменчивости поверхностной температуры воды и воздуха в Карском море на современном этапе потепления климата. Методы кластерного, корреляционного анализа и аппарата эмпирических ортогональных функций использованы для определения пространственно-временной структуры поля температуры и районирования акватории по особенностям климатических изменений. Исследованы возможные причинно-следственные связи этих изменений с вариациями составляющих поля ветра, климатическими индексами и сплоченностью льда. В результате удалось уточнить количественную оценку тенденций и выявить региональные особенности межгодовой изменчивости термических условий Карского моря.

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий в арктических морях отмечались существенные изменения климатических условий, проявившиеся во всех геосферах. Происходящие изменения климатического режима оказывают значительное влияние на климат всего Северного полушария [1, 2]. Они отчетливо проявляются в виде

устойчивых тенденций и статистически значимых трендов межгодовых колебаний температуры воздуха, воды, ледовитости и других гидрометеорологических характеристик, которые влекут за собой масштабные экологические и экономические последствия [3, 4, 5, 6]. Потепление в арктических районах происходит быстрее и масштабнее, чем в других регионах, а происходящие изменения по-разному проявляются в различные сезоны года и в отдельных районах [7, 8, 9, 10, 11, 12]. По данным наблюдений на прибрежных ГМС, повышение среднегодовой температуры воздуха ( $T_a$ ) в морях восточного сектора Арктики составило за последние 4 десятилетия в Восточно-Сибирском море 3,7 °С, в Чукотском 2,9 °С и в море Лаптевых 2,8 °С (тренд около 1,01; 0,78 и 0,75 °С/10 лет соответственно), что примерно в 2,5 раза выше соответствующих оценок для дальневосточных — Берингова и Охотского морей [13, 14]. Увеличение температуры воды ( $T_w$ ) в теплый период в этих арктических морях составило 2,6 °С; 2,3 °С и 1,3 °С соответственно, а в Беринговом и Охотском 0,6 °С и 1,2 °С. В результате потепления за последние 30 лет площадь ледяного покрова в Арктике быстро уменьшается, достигнув очередного минимума (на 36 %) в сентябре 2012 г. [15]. В этот период в бассейне Карского моря повторяемость «мягких» зим увеличилась до 40–50 %, средняя продолжительность ледового периода и повторяемость наличия льда на всей акватории в различные месяцы заметно сократились, а условия плавания судов значительно улучшились [16, 17, 18, 19, 20].

Причины происходящих изменений широко обсуждаются в литературе. Среди них — астрономические факторы [21, 22, 23], перестройка крупномасштабных планетарных процессов [24], а также антропогенная деятельность (увеличение концентрации парниковых газов) [25], совокупность которых приводит к изменениям атмосферной и океанической циркуляции, смене типов атмосферных процессов, положения и выраженности центров действия атмосферы (ЦДА), характеристик теплообмена между морем и атмосферой и сокращению площади ледяного покрова [11, 18, 22, 26–29]. При этом значительный вклад в потепление в полосе средних и высоких широт вносит усиление меридионального переноса тепла и влаги в атмосфере [30–33], а также увеличение количества облачности, препятствующей потере пришедшего адвективного тепла [10, 34]. В связи с таянием, разрушением и сокращением общей площади ледяного покрова море поглощает больше солнечной энергии в течение лета [35, 36]. Осенью часть накопленного тепла возвращается в атмосферу, смягчая климатические условия региона. Кроме того, происходит увеличение поступления тепла в арктические моря за счет речного стока и адвекции более теплых вод из сопредельных районов Атлантического и Тихого океанов [37–40]. В целом однозначного ответа на вопрос о причинах более быстрых климатических изменений в Арктике, по-видимому, не существует, а по мнению некоторых авторов, эти процессы обратимы и в вековом ходе носят циклический характер чередования теплых и холодных эпох [24, 41, 42].

Большая протяженность Карского моря с юго-запада на северо-восток создает заметные различия климатических показателей в разных районах во все сезоны года, однако относительная близость Атлантического океана несколько смягчает климат моря [43]. Анализ и обобщению данных о межгодовой изменчивости термических характеристик этого моря за последние десятилетия посвящен ряд оригинальных и обобщающих работ [16–20, 44 и др.]. Полученные результаты позволяют судить

о состоянии различных компонентов климатической системы и характере внутри-годовых и межгодовых вариаций температуры воды и воздуха, а также ледовых условий за различные периоды. Вместе с тем в этих работах не в полной мере использовалась вся совокупность современных данных реанализа и наблюдений на ГМС береговой сети, поэтому вопрос о степени неоднородности реакции моря на происходящие глобальные климатические изменения остается недостаточно изученным. Цель настоящей работы — выявление пространственных особенностей межгодовых изменений термических условий на акватории Карского моря и их возможных причинно-следственных связей с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере за последние четыре десятилетия (в период общего потепления климатических условий в Арктике).

#### ДАнные И МЕТОды

Для анализа межгодовых изменений термических условий использовались проконтролированные данные срочных измерений температуры воды и воздуха на сети из 13 ГМС Росгидромета за период с 1978 по 2017 г. из архивов Госфонда (<http://meteo.ru/>). По данным срочных наблюдений рассчитывались величины средних месячных, сезонных и средних годовых значений, что обеспечило получение сглаженных, относительно однородных рядов межгодовых изменений приземной температуры воздуха и температуры воды (только за июнь–октябрь). С учетом наличия данных, продолжительности ледового периода и особенностей внутригодового хода температуры воздуха и воды были выделены условно теплый (июнь–октябрь) и условно холодный (ноябрь–апрель) сезоны (периоды года).

В работе были использованы данные оптимальной интерполяции  $T_w$  (NOAA OI SST V2) [45] и реанализа  $T_a$  (NCEP/NCAR Reanalysis 1) [46], поля ветра, а также ряды климатических индексов (КИ), позволяющих оценить влияние крупномасштабных процессов на межгодовую изменчивость термических характеристик исследуемого района: индекс Арктического (АО), Южного (SOI), Северо-Атлантического (NAO) и Атлантического междекадного (AMO) колебаний, Скандинавский (SCAND), Восточно-Атлантический/Западно-Российский (EA/WR) и Полярный/Евразийский (Pol/Eur) индексы. Перечисленные данные получены с сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/> его разработчика: NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA. Региональные индексы зимнего Сибирского (SIB), Азорского (AZOR) максимумов и Исландского минимума (ISL) рассчитывались по величине приземного давления с этого же сайта. В качестве вспомогательной информации были использованы временные ряды ледовитости морей Центра Гадлея по исследованию климата метеослужбы Великобритании (<http://hadobs.metoffice.com/hadisst/data/download.html>) [47], ресурсы разделов сайта ГИЦ РФ АНИИ <http://www.aari.ru/main.php> и другие результаты обработки ледовой информации [15, 16, 18, 20].

Тренды оценивались для временных рядов, включающих среднегодовые значения наблюдаемых параметров и их аномалий ( $\Delta T_a$  и  $\Delta T_w$ ), определяемых как отклонение от средней величины за все годы 30-летнего периода 1984–2013 гг. Расчеты линейных трендов проводились с привлечением стандартного метода МНК. Исходя из длины анализируемых рядов в качестве критического значения коэффициента корреляции на 5 %-ном уровне значимости была принята величина 0,31 (коэффициент детерминации при оценке значимости тренда  $R^2 \geq 0,10$ ).

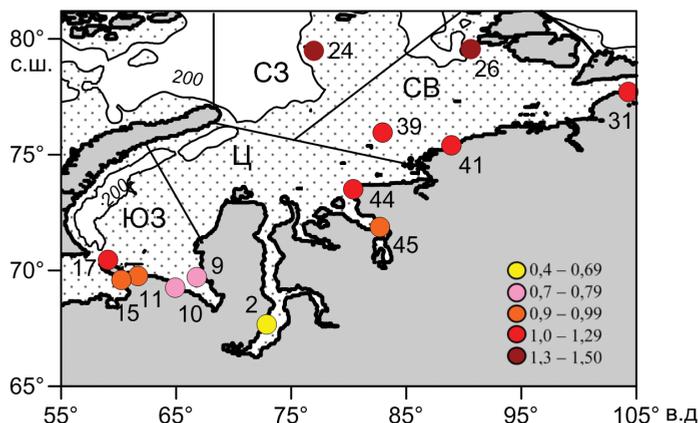


Рис. 1. Границы выделенных районов и величина трендов среднегодовых величин  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) на сети ГМС в Карском море за период с 1978 по 2017 г.

Номер станции соответствует последним значениям 5-значного общероссийского кода пунктов наблюдений, поименованных в табл. 2

Fig. 1. The borders of the identified areas and trend value for annual  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}/10$  years) at the meteorological stations of Roshydromet (GMS) in the Kara Sea in 1978–2018.

The station number corresponds to the last figures of the 5-unit all-Russian code of the observation points mentioned in Table 2

Анализ структуры межгодовых изменений температуры воды на поверхности моря проводился с применением метода разложения полей  $\Delta T_w$  на главные компоненты, или эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). По трем главным компонентам ЭОФ методами кластерного анализа [48] были выделены четыре относительно обособленных по характеру изменений поля  $\Delta T_w$  района: северо-западный (СЗ), северо-восточный (СВ), центральный (Ц) и юго-западный (ЮЗ) (рис. 1).

#### МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ВОДЫ НА ГМС И В ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНАХ

Карское море на севере имеет открытую границу с Арктическим бассейном, на западе граничит с Баренцевым морем, а на востоке с морем Лаптевых. Большая часть моря располагается на шельфе, и оно относится к типу материковых окраинных морей с полярным климатом. Суровый климат Карского моря обуславливает полное покрытие его акватории льдом в зимний период. Близость Атлантического океана является фактором, смягчающим климатические характеристики, однако большая протяженность моря и существенно отличающиеся климатические и гидрологические условия на севере и юге бассейна создают заметные различия в отдельных районах [43]. Эти различия наглядно проявляются при сопоставлении как обобщенных оценок средних и экстремальных величин колебаний  $T_a$  и  $T_w$  (табл. 1), так и особенностей трендов соответствующих температурных изменений  $T_a$  на ГМС (рис. 1).

Средние значения  $T_a$  и  $T_w$  в выделенных районах возрастают с севера на юг примерно на 6 и 3  $^{\circ}\text{C}$  соответственно, годы максимальных значений  $T_a$  в Карском море (2012 и 2016) примерно соответствуют ходу среднегодовых  $\Delta T_a$  во всем Арктическом бассейне [26] и отражают тенденцию потепления, а годы экстремумов  $T_a$  и  $T_w$  не всегда согласуются между собой. Более детальную информацию об особен-

**Средние и экстремальные величины температуры воздуха и температуры воды  
на поверхности моря по данным наблюдений на ГМС  
и в выделенных районах Карского моря**

Значение	Все ГМС	СЗ	СВ	Ц	ЮЗ	Все районы
<i>T<sub>а</sub></i> , °С (среднегодовые, 1978–2017 гг.)						
Среднее	–9,5	–12,0	–13,0	–9,8	–6,5	–10,7
Максимум	–5,7 (2016)	–5,7 (2016)	–9,0 (2016)	–5,1 (2012)	–2,3 (2012)	–6,0 (2012)
Минимум	–12,1 (1979)	–14,8 (1992)	–16,0 (1979)	–13,0 (1998)	–10,4 (1978)	–13,5 (1979)
<i>T<sub>во</sub></i> , °С (теплый сезон, 1982–2017 гг.)						
Среднее	2,8	–0,2	0,1	1,8	2,9	0,7
Максимум	6,5 (2016)	1,1 (2016)	1,4 (1995)	2,9 (2011)	5,0 (2011)	1,9 (1995)
Минимум	1,3 (1986)	–1,4 (2003)	–1,3 (1989)	0,3 (1999)	0,6 (1998)	–0,3 (1998)

*Примечание.* В скобках указан год.

ностях межгодовых изменений температуры воздуха в прибрежной зоне и различных участках акватории моря дают количественные оценки, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

**Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воздуха на ГМС  
и в выделенных районах акватории моря за 1978–2017 гг.**

№ станции	Название ГМС	Зима		Весна		Лето		Осень		Год			
		КЛТ	<i>D</i>	КЛТ	<i>D</i>	КЛТ	<i>D</i>	КЛТ	<i>D</i>	КЛТ	$\sum T_a$	КЛТ <sub>м</sub>	
2	Новый порт	0,03	0	<b>1,11</b>	27	<b>0,57</b>	22	0,10	0,2	<b>0,47</b>	13	1,9	<b>1,72</b> (4)
9	Марресале	0,49	2	<b>1,10</b>	25	<b>0,78</b>	23	<b>0,72</b>	12	<b>0,75</b>	26	3,0	<b>1,73</b> (4)
10	Усть-Кара	0,53	3	<b>1,05</b>	22	<b>0,84</b>	30	0,54	9	<b>0,77</b>	29	3,1	<b>1,57</b> (4)
11	Амдерма	0,91	8	<b>1,09</b>	20	<b>0,91</b>	29	<b>0,69</b>	15	<b>0,93</b>	33	3,3	<b>1,76</b> (4)
15	м. Белый Нос	0,78	7	<b>1,19</b>	28	<b>0,81</b>	26	<b>0,61</b>	11	<b>0,88</b>	33	3,2	<b>1,92</b> (4)
17	м. Болванский Нос	<b>1,85</b>	27	<b>1,14</b>	25	<b>0,79</b>	28	<b>0,77</b>	29	<b>1,16</b>	45	4,6	<b>2,22</b> (11)
24	Остров Визе	<b>2,31</b>	36	<b>1,64</b>	53	0,24	23	<b>1,71</b>	32	<b>1,49</b>	54	6,0	<b>2,65</b> (2)
26	м. Голомянный	<b>1,67</b>	34	<b>1,37</b>	57	0,08	3	<b>2,13</b>	43	<b>1,33</b>	57	5,3	<b>3,47</b> (11)
31	м. Челюскина	<b>1,42</b>	34	<b>1,50</b>	59	0,15	6	<b>1,23</b>	38	<b>1,07</b>	59	4,3	<b>1,94</b> (4)
39	Остров Известий	<b>1,18</b>	–	<b>1,69</b>	–	0,50	–	<b>1,43</b>	–	<b>1,22</b>	–	4,9	<b>2,21</b> (3)
41	м. Стерлегова	<b>1,41</b>	24	<b>1,66</b>	53	0,18	4	<b>0,88</b>	21	<b>1,04</b>	52	4,2	<b>2,36</b> (4)
44	Остров Диксон	<b>1,47</b>	20	<b>1,47</b>	43	<b>0,60</b>	41	<b>0,71</b>	13	<b>1,08</b>	47	3,3	<b>1,87</b> (4)
45	Сопочная Карга	<b>1,10</b>	11	<b>1,52</b>	44	<b>0,45</b>	20	0,67	8	<b>0,89</b>	48	3,6	<b>1,90</b> (4)
Все ГМС		–	–	–	–	–	–	–	–	<b>0,99</b>	52	4,0	<b>3,47</b> (11)
Выделенные районы													
СЗ		<b>2,43</b>	37	<b>1,73</b>	59	<b>0,31</b>	32	<b>2,04</b>	37	<b>1,64</b>	62	6,6	<b>2,76</b> (11)
СВ		<b>1,15</b>	21	<b>1,49</b>	60	<b>0,31</b>	25	<b>1,60</b>	36	<b>1,15</b>	64	4,6	<b>2,19</b> (10)
Ц		<b>1,32</b>	14	<b>1,46</b>	45	<b>0,36</b>	31	<b>0,99</b>	18	<b>1,05</b>	41	4,2	<b>1,89</b> (4)
ЮЗ		<b>1,57</b>	20	<b>1,47</b>	43	<b>0,37</b>	15	<b>0,82</b>	17	<b>1,08</b>	42	4,3	<b>2,22</b> (4)
Все море		<b>1,56</b>	26	<b>1,53</b>	57	<b>0,34</b>	38	<b>1,39</b>	33	<b>1,22</b>	59	4,9	<b>1,92</b> (4)

*Примечания.* КЛТ — коэффициент наклона линейного тренда, °С за 10 лет; *D* — вклад тренда в суммарную дисперсию, %;  $\sum T_a$  — тренд за 1978–2017 гг., °С; КЛТ<sub>м</sub> — максимальная величина КЛТ (в скобках — месяц). Прочерк — отсутствие сопоставимых оценок. Здесь и далее в таблицах полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины трендов и коэффициентов корреляции.

На всех ГМС и в выделенных районах тренды  $T_a$  положительны во все сезоны. Скорость роста среднегодовой температуры воздуха на ГМС, оцениваемая величиной коэффициента линейного тренда (КЛТ), изменялась от 0,47–0,77 °C/10 лет на южном побережье (Новый порт, Марресале, Усть-Кара) до 1,33–1,49 °C/10 лет на севере моря (м. Голомянный, о. Визе), что соответствует возрастанию  $T_a$  за последние 40 лет на величину от 1,9 до 6,0 °C. В среднем по всем ГМС рост составил 4,0 °C, а величина вклада тренда в суммарную дисперсию  $D$  — 52 %. Величина КЛТ в выделенных районах акватории изменялась от минимальных значений 1,05 °C/10 лет (район Ц) до максимальных 1,64 °C/10 лет (район СЗ) и в среднем для всей акватории моря составила 1,22 °C/10 лет, что соответствует возрастанию среднегодовой  $T_a$  на 4,9 °C за 40 лет при  $D = 59$  %. По оценкам авторов, эта величина тренда примерно в 3 раза превосходит соответствующее значение для всего Северного полушария за тот же период. Межгодовые изменения  $T_a$  в выделенных районах характеризуются тесными корреляционными связями ( $R = 0,8–0,9$ ). В межгодовом ходе среднемесячных  $T_a$  наибольшие величины трендов наблюдались главным образом в ноябре и апреле, когда на отдельных станциях они превышали 2–3 °C/10 лет. В целом по акватории моря величины КЛТ в теплый и холодный сезоны составляли 0,70 °C/10 лет и 1,63 °C/10 лет соответственно, т.е. отличались в 2,3 раза.

В табл. 3 приведены количественные оценки межгодовой изменчивости температуры воды на ГМС и в выделенных районах акватории моря.

Таблица 3

**Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воды на ГМС (за 1978–2017 гг.) и в выделенных районах (за 1982–2017 гг.) в теплый период года (июнь–октябрь)**

№ станции	Район, ГМС	$\sigma^2$	$D$	$\sum T_w$	КЛТ	КЛТ <sub>м</sub>	$R$
2	Новый порт	1,52	3	0,7	0,18	<b>0,60</b> (6)	<b>0,67</b>
9	Марресале	3,50	27	3,3	<b>0,83</b>	<b>1,03</b> (7)	<b>0,83</b>
10	Усть-Кара	2,30	28	2,8	<b>0,69</b>	<b>0,92</b> (6)	<b>0,91</b>
11	Амдерма	3,10	43	4,0	<b>0,99</b>	<b>1,49</b> (8)	<b>0,92</b>
15	м. Белый Нос	3,64	40	4,2	<b>1,04</b>	<b>1,47</b> (6)	<b>0,90</b>
17	м. Болванский Нос	3,20	39	3,8	<b>0,96</b>	<b>1,43</b> (8)	<b>0,93</b>
24	о. Визе	0,48	52	1,7	<b>0,43</b>	<b>0,84</b> (8)	<b>0,68</b>
26	м. Голомянный	0,05	1	0,1	0,02	0,06 (9)	<b>0,55</b>
39	о. Известий	1,09	47	2,4	<b>0,61</b>	<b>0,96</b> (8)	–
41	м. Стерлегова	1,19	29	2,0	<b>0,50</b>	<b>0,89</b> (8)	<b>0,73</b>
44	о. Диксон	1,41	42	2,6	<b>0,66</b>	<b>1,51</b> (7)	<b>0,88</b>
45	Сопочная Карга	0,98	21	1,6	<b>0,39</b>	<b>0,66</b> (7)	<b>0,68</b>
Все ГМС		1,11	50	2,4	<b>0,61</b>	<b>1,51</b> (7)	–
Выделенные районы							
СЗ		0,53	38	1,5	<b>0,42</b>	<b>0,67</b> (8)	<b>0,83</b>
СВ		0,39	11	0,7	<b>0,20</b>	<b>0,32</b> (8)	<b>0,66</b>
Ц		0,28	11	0,6	<b>0,17</b>	<b>0,32</b> (6)	<b>0,62</b>
ЮЗ		1,17	14	1,4	<b>0,39</b>	<b>0,72</b> (8)	<b>0,75</b>
Все море		0,36	28	1,1	<b>0,30</b>	<b>0,48</b> (8)	<b>0,79</b>

Примечания.  $\sigma^2$  — дисперсия;  $D$  — вклад тренда в суммарную дисперсию, %;  $\sum T_w$  — тренд за период наблюдений, °C; КЛТ — коэффициент наклона линейного тренда, °C за 10 лет; КЛТ<sub>м</sub> — максимальная величина КЛТ (в скобках — месяц);  $R$  — коэффициент корреляции  $T_a/T_w$ . Прочерк означает отсутствие сопоставимых данных

В теплый период года на 10 из 12 прибрежных станциях и на всей акватории моря отмечались положительные статистически значимые тренды  $T_w$  величиной от 0,17–0,20 °C/10 лет (районы Ц и СВ) до 0,96–1,04 °C/10 лет у юго-западного побережья (Амдерма, м. Белый Нос, м. Болванский Нос — район ЮЗ), при которых рост  $T_w$  на этих ГМС составил около 4,0 °C за 40 лет, а в среднем по всем ГМС — 2,4 °C при  $D = 50\%$ . В целом по акватории моря эта величина в 2 раза меньше, а максимальное значение тренда наблюдалось в северо-западной и юго-западной частях моря. По оценкам авторов, средняя величина тренда  $T_w$  в Карском

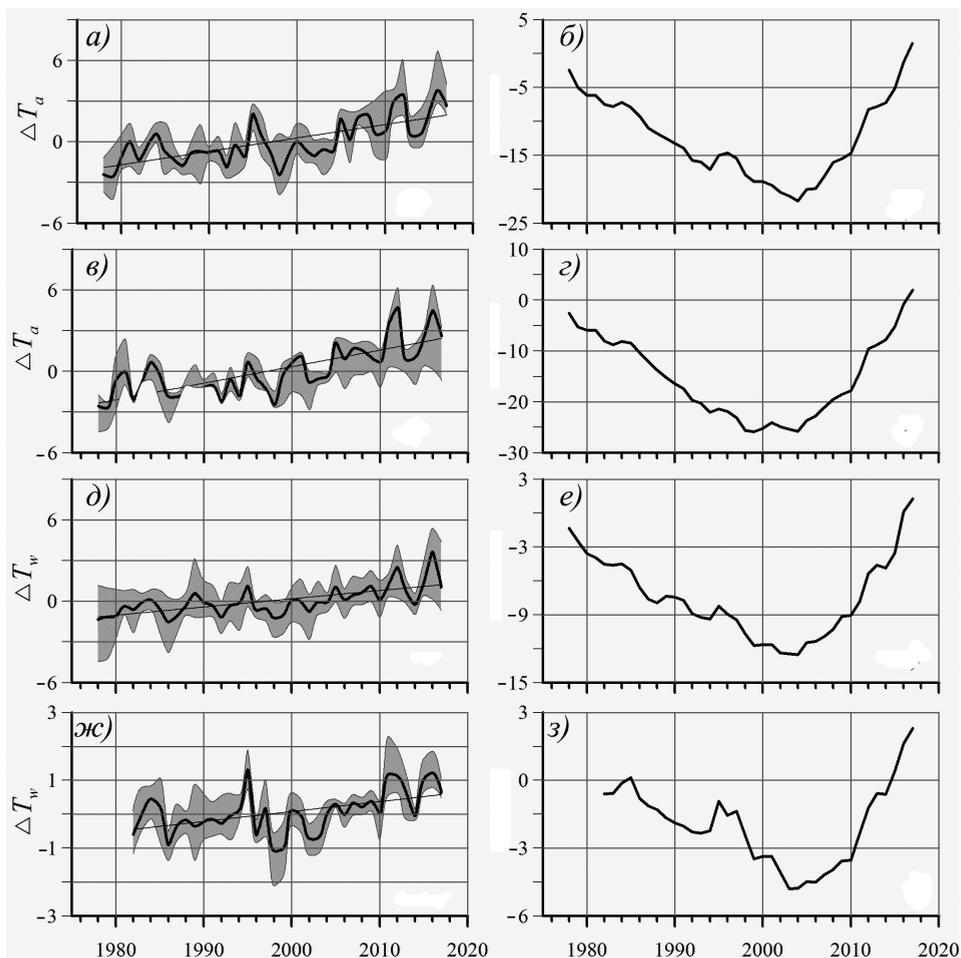


Рис. 2. Межгодовая изменчивость аномалий температуры воздуха  $\Delta T_a$  (среднегодовая) и накопленных аномалий  $\Sigma \Delta T_a$  на ГМС (а, б) и в выделенных районах (в, в). То же для температуры воды  $\Delta T_w$  (теплый период) и  $\Sigma \Delta T_w$  на ГМС (д, е) и в отдельных районах (жс, з).

Показан диапазон колебаний, средние значения и линии тренда

Fig. 2. Year-to-year variability of air temperature anomalies  $\Delta T_a$  (annual) and accumulate anomalies  $\Sigma \Delta T_a$  at GMS (a, б) and in the identified areas (в, в). The same is shown for water temperature  $\Delta T_w$  (warm period) and  $\Sigma \Delta T_w$  at GMS (д, е) and in the identified areas (жс, з).

The range of fluctuations, mean values and lines of the trend are shown

море (0,30 °C/10) примерно в 1,5 раза больше соответствующих значений для ТПО Северного полушария. Максимальные величины дисперсии  $T_w$  наблюдались на станциях, расположенных в юго-западной части моря (табл. 3). Данные наблюдений на ГМС отражают локальные особенности термического режима отдельных участков прибрежных акваторий, включая мелководные бухты, подверженные отепляющему влиянию стока рек, поэтому приведенные оценки отличаются от аналогичных величин для районов открытого моря. Скорость потепления определяется главным образом взаимодействием с атмосферой и местными условиями. Во всех районах открытого моря и на ГМС выражена тесная корреляционная связь между величиной тренда (КЛТ) и коэффициентом корреляции ( $R$ ) изменений  $T_a$  и  $T_w$ . На ГМС Новый порт и м. Голомянный, где отмечаются самые низкие величины  $R$ , положительные тренды  $T_w$  значимы только в отдельные месяцы. На рис. 2 изображены кривые временного хода аномалий и накопленных аномалий  $T_a$  и  $T_w$  на прибрежных ГМС и в выделенных районах.

Временной ход среднегодовых величин отражает чередование теплых и холодных лет в рядах наблюдений, а накопленных аномалий — низкочастотные составляющие и отдельные периоды в межгодовом ходе температуры, которые хорошо согласуются с изменениями ледовитости [18]. Кривые межгодовых колебаний  $\Delta T_a$  на прибрежных ГМС (рис. 2а, б) и в районах открытого моря (рис. 2в, г) различаются лишь в деталях ( $R = 0,95$ ). На фоне общей тенденции роста  $T_a$  в первую половину исследуемого периода, примерно до 1998–2004 гг., преобладали отрицательные аномалии среднегодовой  $T_a$ , скорость потепления была относительно невелика, а в теплый период года наблюдались отрицательные тренды температуры воздуха и воды (табл. 4).

Таблица 4

**КЛТ (°C/10 лет) межгодовых изменений температуры воздуха и воды на акватории Карского моря за различные периоды**

Район	1978–1998 гг.					1998–2017 гг.				
	СЗ	СВ	Ц	ЮЗ	Все море	СЗ	СВ	Ц	ЮЗ	Все море
Температура воздуха										
Средегод.	0,0	0,35	0,25	0,40	0,14	<b>2,86</b>	<b>1,50</b>	<b>2,36</b>	<b>2,31</b>	<b>2,18</b>
Тепл.	–0,52	–0,35	–0,67	–0,28	–0,45	<b>1,59</b>	<b>1,34</b>	<b>1,49</b>	<b>1,52</b>	<b>1,47</b>
Холод.	0,11	0,66	0,06	1,02	0,43	<b>4,80</b>	<b>2,29</b>	<b>3,55</b>	<b>3,19</b>	<b>3,34</b>
Температура воды										
Тепл.	0,13	0,23	–0,03	–0,23	0,08	<b>0,87</b>	<b>0,47</b>	<b>0,86</b>	<b>1,52</b>	<b>0,83</b>

Во второй половине периода в результате смягчения климатического режима [27, 30, 33] скорость роста  $T_a$  многократно увеличилась, а величины трендов стали статистически значимыми. В ноябре 2018 г. средняя температура воздуха в Карском море превысила норму на 4–6 °C [26]. Межгодовые колебания температуры воды и воздуха характеризуются тесными корреляционными связями (табл. 3), поэтому отмеченные выше особенности временной изменчивости аномалий  $T_a$  и  $T_w$  (рис. 2, табл. 4) хорошо согласуются между собой. В целом в арктических морях аномалии ТПО за 2018 год местами превысили нормы на 1 °C и более [26].

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ВОДЫ**

В начале рассматриваемого периода на всей акватории моря наблюдались только отрицательные аномалии среднегодовых величин  $T_a$ . В процессе потепления знак аномалий сменился на противоположный, а область с максимальными величинами тренда среднегодовой температуры воздуха (КЛТ) локализовалась в северо-западной

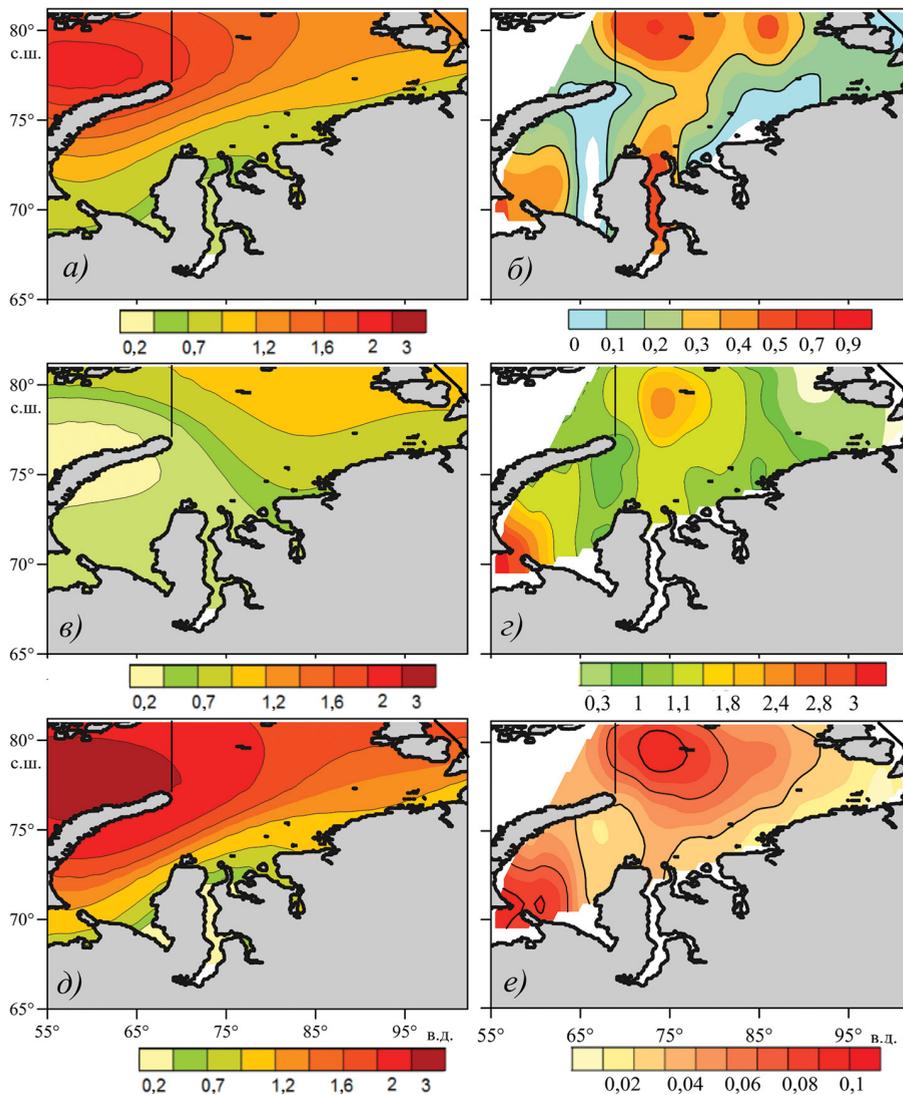


Рис. 3. Коэффициент линейного тренда температуры воздуха (КЛТ, °C/10 лет) для среднегодовой  $T_a$  (a), за теплый (б) и холодный (д) периоды. КЛТ температуры воды (б), распределение аномалий  $T_w$  в 2016 г. (з) и первой моды ЭОФ разложения  $\Delta T_w$  (e). Все данные по  $T_w$  только за теплый период

Fig. 3. Air temperature linear trend coefficient (°C/10 years) for annual  $T_a$  (a), warm (б) and cold (д) period. The data for SST: б — linear trend coefficient (°C/10 years), з — SST anomaly distribution in 2016; e — the first EOF mode SST anomaly decomposition. SST data are given for the warm period only

части акватории на границе с Баренцевым морем (рис. 3а, табл. 2), что отражает влияние Атлантического океана на термические условия Карского моря. В пределах всей акватории тренды  $T_a$  положительны во все сезоны года, а их максимальные величины (до 3,5 °C/10 лет) отмечаются в холодный период (рис. 3д). В теплый период года область максимальных значений КЛТ располагалась в северо-восточной части моря, а минимальных — у побережья Новой Земли (рис. 3е).

В ходе  $T_w$  на поверхности акватории моря в теплую половину года (июнь–октябрь) наблюдались только положительные тренды (рис. 3б), и к концу периода наблюдений присутствовали только положительные аномалии  $T_w$  (рис. 3з). Области с максимальными значениями этих величин располагались в северной и юго-западной частях акватории моря. Отмеченные особенности пространственно-временной изменчивости поля температуры формируются в результате взаимодействия разномасштабных процессов, происходящих в море и атмосфере. Для выявления информации о структуре этого поля были вычислены ЭОФ разложения колебаний  $\Delta T_w$  в теплый период. Первые три моды ЭОФ аккумулируют 84 % дисперсии межгодовых колебаний температуры воды и дают наиболее полное представление об особенностях структуры межгодовой изменчивости  $T_w$ . В ходе временных рядов коэффициентов разложения первой и третьей мод присутствовали статистически значимые положительные тренды, а межгодовые вариации температуры воды в выделенных районах тесно связаны с колебаниями временных коэффициентов первой (все районы, как и для поля  $T_a$ ), второй (районы СВ, ЮЗ) и третьей (район Ц) мод ЭОФ. Первая мода ( $C_1$ ) описывает 60 % общей дисперсии вариаций среднегодовых значений  $T_w$ . Пространственное распределение  $C_1$  на акватории моря представлено положительными значениями и характеризует синфазные колебания  $T_w$  в пределах всего бассейна с двумя максимумами в его северной и юго-западной частях (рис. 3е). При этом особенности пространственного распределения  $C_1$  отражают основные черты полей КЛТ и  $\Delta T_w$  (рис. 3б, з, е).

Моды  $C_2$  и  $C_3$  описывают противофазные, линейно независимые составляющие колебаний  $T_w$  в ортогональных направлениях в районах с различными гидрологическими условиями (карты этих мод в работе не приводятся). Они кратко характеризуются следующими свойствами. Вторая мода (18 % дисперсии  $T_w$ ) образует симметричный диполь с максимумом отрицательных значений на востоке, а положительных — на западе акватории моря. В третьей моде (6 % вклада в дисперсию) выражены мелкомасштабные пространственные особенности колебаний  $T_w$  с тремя максимумами отрицательных значений  $C_3$  в южной части моря и одним — на севере, в районе желоба Св. Анны.

#### **КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, АТМОСФЕРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ И ЛЕДОВЫМИ УСЛОВИЯМИ**

В условиях глобального потепления основными причинами формирования обширных областей устойчивых аномалий  $T_w$  и  $T_a$  в исследуемом районе являются изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции, расположения и выраженности ЦДА, интенсивности и соотношения зональных и меридиональных переносов в атмосфере. Эти изменения характеризуются рядом признаков и отражаются в отдельных циркуляционных показателях — климатических индексах (КИ). Был проведен взаимный корреляционный анализ временных рядов температуры воды и воздуха, коэффициентов мод ЭОФ разложения полей аномалий  $\Delta T_w$  и компонен-

тов  $U$  и  $V$  скорости ветра с индексами, характеризующими состояние и динамику климатической системы в Карском море.

В рассматриваемый период в ходе межгодовых изменений КИ присутствовали статистически значимые положительные и отрицательные трендовые составляющие (табл. 5), отражающие тенденции в изменениях крупномасштабной атмосферной циркуляции [12, 13, 33].

Таблица 5

**Оценки трендов (КЛТ) климатических индексов (КИ) и коэффициентов корреляции изменений температуры воздуха, составляющих  $V$  и  $U$  скорости ветра с колебаниями КИ в теплый и холодный (в скобках) сезоны за 1978–2017 гг.**

Показатель, район	AMO	NAO	SCAND	EA/WR	Pol/Eur
КЛТ	<b>0,2 (0,1)</b>	<b>-0,2 (0,1)</b>	0,0 (0,0)	<b>-0,3 (0,0)</b>	0,0 ( <b>-0,2</b> )
Скорость ветра					
$V$	-0,3 (0,1)	<b>0,3 (0,5)</b>	<b>-0,4 (-0,3)</b>	0,2 (-0,2)	0,0 ( <b>-0,3</b> )
$U$	0,2 (-0,2)	0,0 (0,0)	0,1 (0,2)	<b>-0,4 (0,0)</b>	<b>0,5 (0,5)</b>
Температура воздуха					
СЗ	<b>0,5 (0,6)</b>	-0,2 (0,1)	0,0 (-0,1)	-0,3 (-0,3)	-0,2 ( <b>-0,6</b> )
СВ	<b>0,5 (0,6)</b>	-0,3 (0,2)	0,0 (-0,2)	-0,2 (-0,1)	-0,2 ( <b>-0,5</b> )
Ц	<b>0,5 (0,4)</b>	-0,2 (0,2)	-0,2 (-0,2)	<b>-0,4 (-0,2)</b>	-0,3 ( <b>-0,4</b> )
ЮЗ	<b>0,4 (0,5)</b>	-0,2 (0,3)	-0,2 (-0,1)	<b>-0,6 (-0,3)</b>	-0,3 ( <b>-0,4</b> )
Все море	<b>0,5 (0,5)</b>	-0,3 (0,2)	-0,1 (-0,1)	<b>-0,4 (-0,2)</b>	-0,3 ( <b>-0,5</b> )
Показатель, район	AZOR	SIB	ISL	ISL – SIB	AO
КЛТ	<b>-0,3 (0,0)</b>	* (-0,2)	* (0,0)	* (0,1)	0,0 (0,0)
Скорость ветра					
$V$	-0,2 ( <b>-0,5</b> )	* (0,2)	* ( <b>-0,3</b> )	* ( <b>-0,4</b> )	<b>0,4 (0,0)</b>
$U$	0,1 (0,0)	* ( <b>0,4</b> )	* (0,1)	* (0,0)	<b>0,4 (0,0)</b>
Температура воздуха					
СЗ	<b>-0,4 (-0,1)</b>	* (0,2)	* (-0,1)	* (-0,2)	-0,1 (0,1)
СВ	<b>-0,5 (-0,2)</b>	* (0,3)	* (-0,2)	* (-0,3)	-0,2 (0,2)
Ц	<b>-0,4 (-0,3)</b>	* ( <b>0,3</b> )	* (-0,3)	* ( <b>-0,4</b> )	-0,1 (0,1)
ЮЗ	-0,2 (-0,3)	* ( <b>0,4</b> )	* (-0,3)	* ( <b>-0,4</b> )	0,0 (0,2)
Все море	<b>-0,4 (-0,2)</b>	* ( <b>0,3</b> )	* (0,2)	* ( <b>-0,3</b> )	-0,1 (0,2)

Примечание. \* — отсутствие сопоставимых данных из-за сезонности действия ЦДА.

В теплый сезон в ходе рассматриваемых КИ произошли следующие изменения:

– AMO с середины 1990-х гг. находится в положительной фазе, которая свидетельствует о потеплении в Атлантике и Северном полушарии и может длиться 20–40 лет [49].

– NAO, EA/WR и AZOR — после 1997–1998 гг. находятся преимущественно в отрицательной фазе.

В теплый период изменения AMO и индексов NAO, EA/WR и AZOR происходят в противофазе, характеризуются как умеренными, так и высокими корреляционными связями ( $R = -0,4$ ;  $-0,7$  и  $-0,7$  соответственно) и отражают связи температурного и барического полей Северной Атлантики и западной части северной Евразии [33].

В холодный сезон в ходе индекса АМО присутствует значимый положительный тренд, а Pol/Eur — отрицательный. Переход последнего КИ преимущественно к отрицательной фазе означает ослабление циркумполярной циркуляции (полярного вихря) и связывается с усилением межширотного обмена и потеплением. Связь температурных колебаний (АМО) с этим циркуляционным КИ (Pol/Eur) оценивается коэффициентами корреляции  $R = -0,5$ .

Произошедшая в результате климатического сдвига перестройка барического поля выражена в изменениях ветрового режима. Анализ характеристик межгодовой изменчивости зональной ( $U$ ) и меридиональной ( $V$ ) составляющих скорости ветра показал, что в последние 40 лет наблюдались тенденции усиления ветров южных румбов в холодный период года, а в теплый — северных на  $0,5-0,6$  м·с<sup>-1</sup>. При этом именно в холодный период во всех районах моря отчетливо проявляются тесные корреляционные связи между ростом  $T_a$  и усилением южных ветров ( $R = 0,6-0,7$ ), а в теплое время как для  $T_a$ , так и для  $T_w$  эти связи статистически не значимы. В изменчивости  $V$  компоненты скорости ветра в холодный сезон присутствует вклад колебаний крупномасштабных мод циркуляции атмосферы, выраженных через индексы NAO, SCAND, Pol/Eur, AZOR, ISL и разности ISL – SIB (табл. 5). В теплый сезон эти связи выражены только через NAO, SCAND и AO. Во временном ходе зональной компоненты скорости ветра статистически значимые тренды, как и корреляционные связи с колебаниями  $T_a$  и  $T_w$ , отсутствовали во все сезоны года.

Происходящие изменения температурного режима Карского моря тесно связаны с потеплением в Северной Атлантике, поэтому синфазные колебания  $T_a$  и индекса АМО характеризуются высоким коэффициентами корреляции во всех районах и в течение всего года. В теплый сезон колебания  $T_a$  находятся в противофазе с колебаниями EA/WR, а также индексом Азорского антициклона (AZOR), и на большей части акватории моря соответствующие коэффициенты корреляции статистически значимы (табл. 5). На фоне тенденции ослабления в последние десятилетия этого ЦДА происходило уменьшение градиента приземного давления в направлении центр антициклона — Скандинавия, сопровождавшееся увеличением поступления более теплых воздушных масс из Атлантики. Роль циркуляционных процессов, описываемых индексами NAO, SCAND, Pol/Eur, AO и SOI, в изменениях  $T_a$  на акватории моря в теплый сезон не проявляется. В холодный сезон на всей акватории моря выражены корреляционные связи  $T_a$  с колебаниями Pol/Eur, а на акваториях центрального и юго-западного районов с индексами сибирского антициклона (SIB) и разности (ISL – SIB). В это время года на отдельных ГМС этих районов статистически значимы коэффициенты корреляции  $T_a$  с индексами NAO и AO.

В теплый период года, когда акватория моря освобождается ото льда, корреляционные связи вариаций температуры воды и КИ проявляются как на акваториях северной части моря (районы СЗ и СВ), так и на большинстве прибрежных и островных ГМС только в ходе четырех индексов, межгодовая изменчивость которых характеризуется статистически значимыми трендами (табл. 5, 6). В этих районах наблюдались и наибольшие тренды межгодовых изменений  $T_a$  (см. табл. 2).

Колебания АМО синхронизированы с вариациями коэффициентов первой и третьей мод ЭОФ, EA/WR — только с третьей, а AZOR — с первой и второй. Как было отмечено выше, особенности пространственного распределения коэффициентов моды  $S_1$  отражают основные черты полей КЛТ и  $\Delta T_w$  (рис. 3), которые, по-видимому, свидетельствуют о преобладающем вкладе процессов, описываемых индексами АМО

**Коэффициенты корреляции  $T_w$  и мод  $C_1$ – $C_3$  ЭОФ  $\Delta T_w$  с климатическими индексами в теплый период года в 1982–2017 гг.**

Район, показатель	AMO	NAO	EA/WR	AZOR
$T_w$				
СЗ	<b>0,4</b>	–0,3	<b>–0,4</b>	<b>–0,4</b>
СВ	0,2	<b>–0,4</b>	–0,1	<b>–0,5</b>
Ц	0,1	–0,2	–0,2	–0,2
ЮЗ	0,2	0,0	–0,3	–0,1
Все море	<b>0,3</b>	–0,3	–0,3	<b>–0,4</b>
Все ГМС	<b>0,5</b>	–0,3	<b>–0,5</b>	<b>–0,4</b>
Моды ЭОФ $\Delta T_w$				
$C_1$	<b>0,3</b>	–0,3	–0,3	<b>–0,4</b>
$C_2$	–0,1	0,3	–0,1	<b>0,3</b>
$C_3$	<b>0,4</b>	0,0	<b>–0,4</b>	–0,1

и AZOR в межгодовые изменения поля  $T_w$  в теплый сезон. Интересно отметить, что изменчивость третьей моды  $C_3$  имеет также дальние связи с колебаниями тихоокеанского индекса PDO ( $R = -0,5$ ).

Естественно, что происходящие современные климатические изменения термического режима Карского моря непосредственно отражаются в вариациях различных характеристик его ледовитости [9, 16, 18, 19, 20, 50, 51 и др.]. В данной работе рассмотрены некоторые особенности пространственно-временной структуры вариаций сплоченности льда на начальном и заключительном этапах развития ледяного покрова: в начальные периоды нарастания, распространения (условно октябрь–декабрь) и очищения ото льда (условно апрель–июнь) акватории моря, а также взаимосвязи между изменениями температуры воздуха и ветра и сплоченностью льда в процессе эволюции ледяного покрова. На выбранных временных интервалах изменчивость площади ледяного покрова максимальна, особенно в последние годы, а в остальное время года в течение ледового периода поверхность моря практически всегда полностью покрыта льдом [16, 20, 51].

Обычно пространственные особенности распределения и временной изменчивости сплоченности льда отражены в величинах среднеквадратических отклонений и ЭОФ, формирующих эти отклонения и являющихся собственными векторами корреляционной матрицы аномалий поля сплоченности льда [52]. На рис. 4 приведены пространственные распределения первой моды ЭОФ ( $C_1$ ) сплоченности льда, а также временные функции  $C_1$  и ход аномалий температуры воздуха на обоих этапах развития ледяного покрова.

В период с октября по декабрь первые три моды ЭОФ аккумулируют 82 % дисперсии межгодовых колебаний ледовитости, а в период с апреля по июнь значительно меньше — 65 %. Т.е. в эти периоды интенсивность процессов возрастания и уменьшения ледовитости значительно различается, что также отражается в характеристиках пространственного распределения среднеквадратичных величин ( $\sigma$ ) сплоченности льда и трендах временного хода  $C_1$  ЭОФ. В ходе временных рядов первой моды присутствовали статистически значимые отрицательные тренды. В период с октября по декабрь КЛТ вариаций сплоченности льда в два раза превосходит соответствующую оценку для весенне-летнего периода, а после 2003 г. в обоих случаях процесс уменьшения ледовитости заметно ускоряется, что согласу-

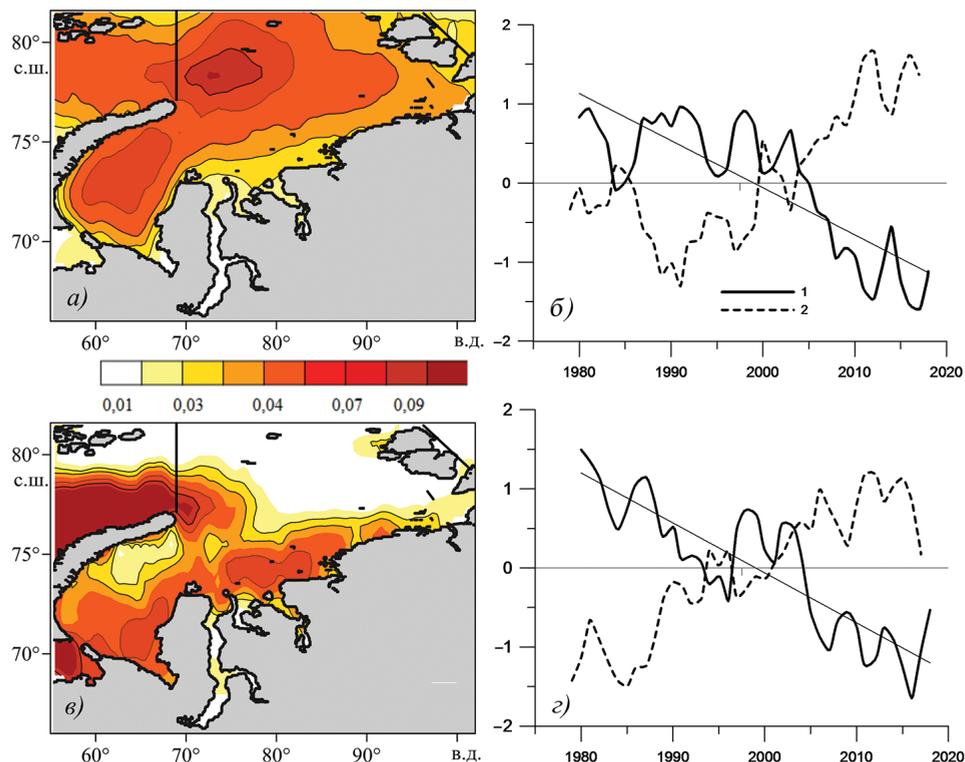


Рис. 4. Пространственное распределение изменчивости сплоченности льда, определяемое первой модой ЭОФ ( $C_1$ ), и вариации нормализованных временных функций  $C_1$  и аномалий температуры воздуха ( $\Delta T_a$ ) в октябре – декабре (а, б) и в апреле – июне (в, г). Показан линейный тренд  $C_1$ . Обозначения: 1 —  $C_1$ ; 2 —  $\Delta T_a$

Fig. 4. Spatial distribution of ice compaction variability determined by the first EOF mode ( $C_1$ ), and variation of normalized temporary  $C_1$  functions and air temperature anomalies ( $\Delta T_a$ ) in October–December (a, б) and in April – June (в, г). Linear trend is shown. Legend: 1 —  $C_1$ ; 2 —  $\Delta T_a$

ется с особенностями межгодового хода среднегодовых температур воздуха и воды (рис. 2) и увеличением количества «мягких» зим в Карском море [16, 20]. В оба рассматриваемых периода пространственное распределение  $C_1$  на акватории моря (69 и 44 % от общей дисперсии в указанные периоды) характеризует синфазные колебания ледовитости в пределах всего бассейна с двумя максимумами в его северной и юго-западной частях (рис. 4а, в), как это выражено для той же моды изменчивости поля температуры воды (рис. 3е). Моды  $C_2$  и  $C_3$  описывают более мелкомасштабные, разнонаправленные процессы изменчивости структуры поля сплоченности льда, происходящие в прибрежной зоне и различных участках акватории моря.

Межгодовые вариации  $C_1$  характеризуются тесными корреляционными связями с изменениями температуры воздуха как в годовом ходе, так и в рассматриваемые периоды формирования и эволюции ледяного покрова ( $R = -0,7...-0,9$ ). В эти периоды проявляются статистически значимые связи колебаний  $C_1$  только с двумя климатическими индексами — АМО ( $R = 0,5$ ) и Pol/Eur ( $R = 0,4$  — только в период нарастания и распространения льда).

Связи между временной изменчивостью  $C_1$  и характеристиками поля ветра в рассматриваемые периоды более слабые, а соответствующие коэффициенты корреляции статистически значимы только для меридиональной компоненты скорости ( $R = -0,4$ ). Как было отмечено выше, в последние десятилетия наблюдалось усиление ветров южных румбов, особенно в холодный период года. При этом именно в холодный период во всех районах моря отчетливо проявляются тесные корреляционные связи между ростом  $T_a$  и усилением южных ветров ( $R = 0,6-0,7$ ). Тенденция усиления меридиональной составляющей скорости ветра может быть дополнительным фактором уменьшения ледовитости, способствуя как адвекции дополнительного тепла из низких широт, так и выносу части плавучих льдов за пределы акватории моря.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатические изменения в исследуемых районах прибрежной и островной зоны Карского моря проявляются в трендах устойчивого увеличения среднегодовой  $T_a$  на ГМС со скоростью от  $0,47-0,77$  °C/10 лет у юго-западного побережья до  $1,33-1,49$  °C/10 лет на севере моря, что эквивалентно потеплению от  $1,9$  до  $6,0$  °C за последние 40 лет. Величина тренда  $T_a$  в открытом море изменялась от минимальных значений  $1,05$  °C/10 лет в центральной части акватории до максимальных  $1,64$  °C/10 лет в ее северо-западной части, а в среднем для всего моря составила  $1,22$  °C/10 лет, что соответствует возрастанию среднегодовой  $T_a$  на  $4,9$  °C за 40 лет. Эта величина тренда примерно в 3 раза превосходит соответствующее значение для всего Северного полушария за тот же период. В межгодовом ходе среднемесячных значений  $T_a$  наибольшие величины трендов наблюдались главным образом в ноябре и апреле и на отдельных станциях превышали  $2-3$  °C/10 лет. В целом по акватории моря величины трендов  $T_a$  в теплый и холодный сезоны составили  $0,70$  °C/10 лет и  $1,63$  °C/10 лет соответственно. На фоне отмеченных тенденций роста среднегодовой  $T_a$  можно выделить отдельные anomalно теплые (2012 и 2016) и anomalно холодные (1978, 1979, 1992 и 1998) годы. В среднем по акватории моря за рассматриваемый период 2012 и 1979 гг. были наиболее теплым и холодным соответственно.

В теплый период года на всей акватории моря наблюдались положительные тренды температуры воды с максимальной величиной до  $1$  °C/10 лет на ГМС у юго-западного побережья. В среднем по данным всех ГМС тренд оценивался величиной  $0,61$  °C/10 лет, а увеличение  $T_w$  за 40 лет составило  $2,4$  °C. В целом по акватории моря эти величины в 2 раза меньше, однако и они примерно в 1,5 раза превосходят соответствующие значения для ТПО Северного полушария. Максимальное значение тренда ( $0,4$  °C/10 лет) наблюдалось в северо-западной и юго-западной частях моря. В этих районах отмечались наибольшие значения коэффициентов корреляции колебаний  $T_a$  и  $T_w$ . В межгодовом ходе среднемесячных значений  $T_w$  наибольшие величины трендов наблюдались в период с июня по август, когда они были в  $1,5-2$  раза больше среднегодовых. Межгодовые колебания температуры воды и воздуха характеризуются тесными корреляционными связями, поэтому особенности временной изменчивости anomalий  $T_a$  и  $T_w$  хорошо согласуются между собой. На фоне общей тенденции роста температуры воздуха и воды в первую половину периода наблюдений, примерно до 1998–2004 гг., преобладали отрицательные anomalии среднегодовой  $T_a$ , скорость потепления была относительно невелика. Во второй половине периода скорость роста  $T_a$  и  $T_w$  многократно увеличилась.

В ходе межгодовых изменений климатических индексов присутствовали статистически значимые трендовые составляющие, которые указывают на произо-

шедшую в конце 1990-х — начале 2000-х гг. смену режима и изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции. В исследуемом районе наблюдались тренды усиления ветров южных румбов в холодный период года, а в теплый — северных на  $0,1-0,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}/10 \text{ лет}$ , и именно в холодный период во всех районах моря отчетливо проявляются тесные корреляционные связи между возрастанием  $T_a$  и изменениями меридиональной компоненты скорости ветра, а в теплое время как для  $T_a$ , так и  $T_w$  они статистически не значимы.

В холодный сезон в изменчивости  $V$  компоненты скорости ветра присутствует вклад колебаний крупномасштабных мод циркуляции атмосферы, выраженных через индексы NAO, SCAND, Pol/Eur, AZOR, ISL и разности ISL–SIB. В теплый сезон эти связи выражены только через NAO, SCAND и AO. В теплый сезон проявляются статистически значимые корреляционные связи между увеличением температуры воды, воздуха и процессами, параметризуемыми индексами AMO, EA/WR и AZOR, а в холодный ( $T_a$ ) — AMO, Pol/Eur, SIB и ISL – SIB.

В межгодовом ходе формирования и эволюции ледяного покрова отчетливо выражен тренд уменьшения сплоченности льда. Причем в период нарастания и распространения льда величина этого тренда для первой моды ЭОФ в два раза превосходит соответствующую оценку для периода очищения акватории ото льда. Межгодовые вариации ледовитости характеризуются тесными корреляционными связями с изменениями температуры воздуха как в годовом ходе, так и в рассматриваемые периоды формирования и эволюции ледяного покрова ( $R = -0,7-0,9$ ). В эти периоды проявляются статистически значимые связи колебаний первой моды ЭОФ только с двумя климатическими индексами — AMO ( $R = 0,5$ ) и Pol/Eur ( $R = 0,4$  — только в период нарастания и распространения льда). Связи между временной изменчивостью ледовитости с характеристиками поля ветра в рассматриваемые периоды более слабые, а соответствующие коэффициенты корреляции статистически значимы только для меридиональной компоненты скорости ( $R = -0,4$ ).

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках темы государственного задания ТОИ ДВО РАН по программе «Фундаментальные проблемы изучения и освоения дальневосточных морей России и Восточного сектора Арктики». Авторы благодарят разработчиков за возможность использовать данные, размещенные на сайтах <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>, <http://www.aari.ru/main.php> и <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/>. Авторы признательны рецензентам за конструктивные комментарии.

**Acknowledgments.** The study was conducted in the framework of the program “Fundamental problems of studying and development of the Far Eastern Seas of Russia and the Eastern Sector of Arctic”. Authors thank the program developers for the opportunity to use the data at <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>, <http://www.aari.ru/main.php> and <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/>. The authors are also grateful to the reviewers for their constructive comments.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 / eds.: Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. United Kingdom and New York, NY, USA / Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

2. *Johannessen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W.* Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalization // *Tellus A*. 2016. V. 68. P. 28234.
3. *Callaghan T. V., Johansson M., Key J., Prowse T., Ananicheva M., Klepikov A.* Feedbacks and interactions: From the Arctic cryosphere to the climate system // *Ambio*. 2011. V. 40. P. 75–86. doi:10.1007/s13280-011-0215-8.
4. *Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.* Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // *Арктика: экология и экономика*. 2012. № 2 (6). С. 66–79.
5. *Ковалевский Д.В., Алексеев Г.В., Бобылев Л.П., Данилов А.И.* Последствия изменений климата для некоторых видов хозяйственной деятельности в Арктике // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. № 4 (94). С. 90–98.
6. *Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., Anderson L.G., Sergienko V., Pugach S., Dudarev O., Char-kin A., Gukov A., Bröder L., Andersson A., Spivak E., Shakhova N.* Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. P. 361–365. doi: 10.1038/NGEO2695.
7. *Захаров В.Ф.* Похолодание Арктики и ледяной покров арктических морей. Л.: Гидромете-оиздат, 1976. 95 с.
8. *Polyakov I. V., Alekseev G. V., Bekryaev R. V., Bhatt Uma, Colony R. L.* Observationally based assessment of polar amplification of global warming // *Geophys. Res. Lett*. 2002. V. 29 (18). P. 1878. doi: 10.1029/2001GL011111.
9. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007. № 75. С. 149–160.
10. *Шерстюков Б.Г.* Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2008. 247 с.
11. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Науч. рук. В.М. Катцов, С.М. Семенов. М.: Росгидромет, 2014. 1005 с.
12. *Алексеев Г.В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11–26.
13. *Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А.* Тенденции климатических изменений термических условий моря Лаптевых за последние 37 лет // *Вестник ДВО РАН*. 2019. № 1. С. 97–107.
14. *Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А.* Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // *Известия ТИНРО*. 2018. Т. 193. С. 167–182. doi: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182.
15. *Шалина Е.В., Бобылев Л.П.* Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 6. С. 28–41.
16. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
17. *Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P.* Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov // *Oceanologia*. 2014. V. 56 (3). P. 445–460.
18. *Бородачев В.Е., Бородачев И.В.* Ледовитость Карского моря в вариациях климата Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 2 (104). С. 57–67.
19. *Карклин В.П., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П.* Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. № 4 (114). С. 37–47.

20. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
21. *Карклин В.П., Ковалев Е.Г.* Влияние солнечной активности на формирование крупных аномалий ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 28–35.
22. *Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е.* Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова Евразийский арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5–14.
23. *Абдусаматов Х.И.* Солнце диктует климат. СПб.: Логос, 2009. 198 с.
24. *Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е.* О характере и причинах изменений климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 15–23.
25. *Сорохтин О.Г.* Парниковый эффект: миф и реальность // Вестник РАЕН. 2002. Т. 1. № 1. С. 8–21.
26. *Бирман Б.А., Бережная Т.В., Голубев А.Д.* Основные погодно-климатические особенности Северного полушария Земли. 2018 год. Аналитический обзор. М.: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 79 с.
27. *Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е.* Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 33–41.
28. *Ашик И.М., Тимохов Л.А.* Ожидаемые изменения гидрологических условий в арктических морях и их последствия // Сб. тезисов Всероссийской конф. с международным участием: Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата / Сост. С.В. Рябченко, Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: ИД САФУ, 2014. С. 25–26.
29. *Логинов В.Ф., Микуцкий В.С.* Изменения климата: тренды, циклы, паузы. Минск: Беларуская навука, 2017. 179 с.
30. *Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П., Карнаухов А.А.* Изменение планетарного климатического режима на рубеже XX–XXI веков // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21. № 1. С. 160–169. doi: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169.
31. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М.* Изменения климата Арктики и Антарктики — результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 52–61.
32. *Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П.* Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на потепление в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43–46. doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-43-63.
33. *Попова В.В.* Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 84–111. doi: 10.21513/2410-8758-2018-1-84-1.11.
34. *Graversen R.G., Mauritsen T., Tjernstrom M., Kallen E., Svensson G.* Vertical structure of recent Arctic warming // Nature. 2008. V. 451. P. 53–54. doi:10.1038/nature06502.
35. *Curry J.A., Schramm J.H., Ebert E.E.* Sea ice albedo feedback mechanism // Journ. Clim. 1995. V. 8. P. 240–247.
36. *Perovich D. K., Light B., Eicken H., Jones K.F., Runciman K., Nghiem S.V.* Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979–2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. L19505. doi:10.1029/2007GL031480.
37. *Semiletov I., Dudarev O., Luchin V., Charkin A., Shin K.-H., Tanaka N.* The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L10614. doi:10.1029/2005GL022490.
38. *Магрицкий Д.В.* Тепловой сток рек в моря российской Арктики и его изменения // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2009. № 5. С. 69–77.

39. *Luchin V., Paneled G.* Thermal regimes in the Chukchi sea from 1941–2008 // *Deep-Sea Research II*. 2014. V. 109. С. 14–26.
40. *Аксенов П.В., Иванов В.В.* «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64 (1). С. 42–54. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
41. *Белязо В.А.* Планетарные циклы в колебаниях атмосферной циркуляции и их проявление в некоторых процессах Арктики // *Тр. ААНИИ*. 1999. Т. 441. С. 46–51.
42. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М.* 60-летняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // *Материалы гляциологических исследований*. 2008. Т. 105. С. 158–165.
43. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: Изд. МГУ, 1982. 192 с.
44. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Под. ред. А.И. Данилова, Е.У. Миронова, В.А. Спичкина. СПб.: ААНИИ, 2004. 430 с.
45. *Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W.* An improved in situ and satellite SST analysis for climate // *Journal of Climate*. 2002. V. 15. Iss. 13. P. 1609–1625. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2.
46. *Kalnay E., Kanamishi M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gardin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chellian M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang G., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. V. 77. № 3. P. 437–472.
47. *Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *Journal of Geophysical Research*. 2003. V. 108. № D14. P. 4407. doi: 10.1029/2002JD002670.
48. *Ding C., He X.* K-means clustering via principal component analysis // *Proc. 21st Intern. conf. on machine learning*. Canada, Banff: ACM Press, 2004. P. 225–232. doi: 10.1145/1015330.1015408.
49. *Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J.* The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. № 10. P. 2077–2080.
50. *Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A.* Arctic Ocean Heat Impact on Regional Ice Decay: A Suggested Positive Feedback // *J. Phys. Oceanogr.* 2016. V. 46. P. 1437–1456. doi: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
51. *Жичкин А.П.* Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // *Вестник Кольского научного центра РАН. Естественные и технические науки*. 2015. № 1 (20). С. 55–64.
52. *Плотников В.В.* Пространственно-временная изменчивость ледяного покрова залива Петра Великого // *Вестник ДВО РАН*. 2013. № 6. С. 42–49.

## REFERENCES

1. *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. Stocker, T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.). United Kingdom and New York, NY, USA. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
2. *Johannessen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W.* Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalisation. *Tellus A*. 2016, 68: 28234.

3. Callaghan T. V., Johansson M., Key J., Prowse T., Ananicheva M., Klepikov A. Feedbacks and interactions: From the Arctic cryosphere to the climate system. *Ambio*. 2011, 40: 75–86. doi:10.1007/s13280-011-0215-8.
4. Kattsov V.M., Porfiryev B.N. Climate change in the Arctic: implications for the environment and the economy. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: Ecology and Economy. 2012, 2 (6): 66–79. [In Russian].
5. Kovalevskii D.V., Alekseev G.V., Bobylev L.P., Danilov A.I. Impacts of climate change on certain economic activities in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 94 (4): 90–98. [In Russian].
6. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., Anderson L.G., Sergienko V., Pugach S., Dudarev O., Char-kin A., Gukov A., Bröder L., Andersson A., Spivak E., Shakhova N. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon. *Nature Geoscience*. 2016, 9: 361–365. doi: 10.1038/NCEO2695.
7. Zakharov V.F. *Pokholodanie Arktiki i ledianoi pokrov arkticheskikh morei*. Cold snap of the Arctic and ice cover of the Arctic seas. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 95 p. [In Russian].
8. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt Uma, Colony R.L. Observationally based assessment of polar amplification of global warming. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29 (18): 1878. doi: 10.1029/2001GL011111, 2002.
9. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolianitskii V.M. Climatic changes of ice conditions in the Arctic seas of the Euroasian shelf. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2007, 75: 149–160. [In Russian].
10. Sherstiukov B.G. *Regional'nye i sezonnye zakonomernosti izmenenii sovremennogo klimata*. Regional and seasonal regularities of changes of the modern climate. Obninsk: GU «VNIIGMI-MTsD», 2008: 247 p. [In Russian].
11. Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. Ed. V.M. Kattsov, S.M. Semenov. Moscow: Roshydromet, 2014: 1005 p. [In Russian].
12. Alekseev G.V. *Proiavlenie i usilenie global'nogo potepleniia v Arktike*. Manifestation and strengthening of global warming in the Arctic. *Fundamental'naia i prikladnaia klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2015, 1: 11–26. [In Russian].
13. Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Vorontsov A.A. Tendencies of climate changes for thermal conditions of the Laptev Sea over last 37 years. *Vestnik DVO RAN*. Bulletin of the Far East branch of the Russian Academy of Sciences. 2019, 1: 97–107. [In Russian].
14. Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Vorontsov A.A. Tendencies of climate changes for thermal conditions in the coastal waters of the western Bering Sea and adjacent areas in the last decades. *Izvestiya TINRO*. TINRO News. 2018, 193: 167–182. doi: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182. [In Russian].
15. Shalina E.V., Bobylev L.P. Change of ice conditions in the Arctic according to satellite observations. *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2017, 14, 6: 28–41. [In Russian].
16. Dumanskaja I.O. *Ledovye usloviia morei evropeiskoi chasti Rossii*. Ice conditions of the European Russia seas. Obninsk: IG-SOCIN, 2014: 608 p. [In Russian].
17. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P. Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov. *Oceanologia*. 2014, 56 (3): 445–460.
18. Borodachev V.E., Borodachev I.V. The Kara Sea ice extent and the Arctic climate variations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2015, 2 (104): 57–67. [In Russian].
19. Karklin V.P., Yulin A.V., Sharatunova M.V., Mochnova L.P. Climat variability of the Kara Sea ice massifs. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2017, 4 (114): 37–47. [In Russian].

20. Dumanskaia I.O. *Ledovye usloviia morei aziatskoi chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of an Asian part of Russia. Obninsk: IG-SOTsIN, 2017: 640 p. [In Russian].
21. Karklin V.P., Kovalev E.G. Influence of solar activity on ice cover of the Arctic seas. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1994, 432: 28–35. [In Russian].
22. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Frolov I.E. Intra century climate changes, areas of an ice cover Eurasian Arctic seas and their possible reasons. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2005, 6: 5–14. [In Russian].
23. Abdusamatov Kh.I. *Solntse diktuet klimat*. The sun dictates climate. St. Petersburg: Logos, 2009: 198 p. [In Russian].
24. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M., Frolov I.E. On the character and causes of the Earth's climate changes. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2009, 1 (81): 15–23. [In Russian].
25. Sorokhtin O.G. *Parnikovyi effekt: mif i real'nost'*. Greenhouse effect: myth and reality. *Vestnik RAEN*. Bulletin of RANS. 2002, 1, 1: 8–21. [In Russian].
26. Birman B.A., Berezhnaya T.V., Golubev A.D. *Osnovnye pogodno-klimaticheskie osobennosti Severnogo polushariia Zemli. 2018 god. Analiticheskii obzor. FGBU «Gidromettsentr Rossii»*. The main weather-climatic characteristics of the Earth northern hemisphere. 2018. Analytical review. Moscow: Hydrometeoizdat, 2019: 79 p. [In Russian].
27. Alekseev G.V., Radionov V.F. Aleksandrov E.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E. Arctic climate change under global warming. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2015, 1 (103): 33–41. [In Russian].
28. Ashik I.M., Timokhov L.A. The expected changes of hydrological conditions in the Arctic seas and their consequences. Book of abs. All-Russian conf. “State of the Arctic seas and territories in the face of climate change”. Ed. Riabchenko S.V., North (Arctic) Federal M.V. Lomonosov' University. Arkhangelsk: SAFU ID, 2014: 25–26. [In Russian].
29. Loginov V.F., Mikutskii V.S. *Izmeneniia klimata: trendy, tsikly, pauzy*. Climate change: trends, cycles, pause. Minsk: Belarускаia navuka, 2017: 179 p. [In Russian].
30. Ponomarev V.I., Dmitrieva E.V., Shkorba S.P., Karnaukhov A.A. Change of the global climate regime at the turn of the XX–XXI centuries. *Vestnik MGTU*. Bulletin of MGTU. 2018, 21, 1: 160–169. doi: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169. [In Russian].
31. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M. Climate change in the Arctic and Antarctic — the result of the natural causes. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2010, 2 (85): 52–61. [In Russian].
32. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgil'deeva A.V., Bobylev L.P. Influence of atmospheric transfers of heat and moisture on warming in the Arctic during the winter period. *Fundamental'naia i prikladnaia klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2016, 1: 43–46. doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-43-63. [In Russian].
33. Popova V.V. Present-day changes in climate in the North Eurasia as a manifestation of variation of the large-scale atmospheric circulation. *Fundamental'naia i prikladnaia klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2018, 1: 84–111. doi: 10.21513/2410-8758-2018-1-84-111. [In Russian].
34. Graverson R.G., Mauritsen T., Tjernstrom M., Kallen E., Svensson G. Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature*. 2008, 451: 53–54. doi: 10.1038/nature06502.
35. Curry J.A., Schramm J.H., Ebert E.E. Sea ice albedo feedback mechanism. *Journ. Clim.* 1995, 8: 240–247.
36. Perovich D. K., Light B., Eicken H., Jones K.F., Runciman K., Nghiem S.V. Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979–2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback. *Geophys. Res. Lett.* 2007, 34: L19505. doi:10.1029/2007GL031480.

37. Semiletov, I., O. Dudarev, V. Luchin, A. Charkin, K.-H. Shin, and N. Tanaka The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters. *Geophys. Res. Lett.* 2005, 32: L10614. doi:10.1029/2005GL022490.
38. Magritskii D.V. Thermal drain of the rivers to the seas of the Russian Arctic and its change. *Vestn. MGU. Ser. 5 Geografiia*. MSU bulletin. Geography series 5. 2009, 5: 69–77. [In Russian].
39. Luchin V., Paneled G. Thermal regimes in the Chukchi sea from 1941–2008. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2014, 109: 14–26. doi: 10.1016/j.dsr2.2014.05.007.
40. Aksenov P. V., Ivanov V. V. “Atlantification” as a probable cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 1: 42–54. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54. [In Russian].
41. Beliazo V.A. Planetary cycles in fluctuations of atmospheric circulation and their manifestation in some processes of the Arctic. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1999, 441: 46–51. [In Russian].
42. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolianitskii V.M. 60-year cycle in climate change in the polar regions. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*. Materials of glaciological researches. 2008, 105: 158–165. [In Russian].
43. Dobrovolsky A.D., Zalogin B. S. *Morya SSSR*. Sea of the USSR. Moscow: MGU, 1982: 192 p. [In Russian].
44. *Izmenchivost' prirodnikh uslovii v shel'fovoi zone Barentseva i Karskogo morei*. Variability of an environment in a shelf zone Barents and Karsky seas (Eds. Danilov A.I., Mironov E.U., Spichkin V.A.). Saint Petersburg: AANII, 2004: 430 p. [In Russian].
45. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*. 2002, 15, 13: 1609–1625. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2.
46. Kalnay E., Kanamishi M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gardin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chellian M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang G., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996, 77, 3: 437–472. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2.
47. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.* 2003, 108 (D14): 4407. doi: 10.1029/2002JD002670.
48. Ding C., He X. K-means clustering via principal component analysis. *Proc. 21st Intern. Conf. on machine learning*. Banff, Canada, ACM Press, 2004: 225–232. doi: 10.1145/1015330.1015408.
49. Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*. 2001, 28, 10: 2077–2080.
50. Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: a suggested positive feedback. *J. Phys. Oceanogr.* 2016, 46: 1437–1456. doi: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
51. Zhichkin A.P. Dynamics of interannual and seasonal anomalies of ice cover of the Barents and Karsky seas. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. Bulletin of the Kola scientific center RAS. Natural and technical science. 2015,1 (20): 55–64. [In Russian].
52. Plotnikov V.V. The spatial-temporal variability of the ice cover of Peter the Great Bay. *Vestnik DVO RAN*. FEB RAS Bulletin. 2013, 6: 42–49. [In Russian].