

УДК 551.465.62(265.51)

И.Д. Ростов¹, Е.В. Дмитриева¹, А.А. Воронцов^{2*}¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;² Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации — Мировой центр данных,
249035, г. Обнинск Калужской обл., ул. Королева, 6**ТЕНДЕНЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ
РАЙОНАХ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ**

По данным срочных наблюдений на сети гидрометеорологических станций Росгидромета за 1980–2016 гг. и реанализа (по данным NOAA) выполнен анализ межгодовой изменчивости поверхностной температуры воды в прибрежных акваториях и прилегающих районах западной части Берингова моря и Камчатки на современном этапе «потепления». С использованием аппарата эмпирических ортогональных функций, методов кластерного и корреляционного анализа проведен анализ пространственно-временной структуры колебаний температуры и районирование акваторий по особенностям современных климатических изменений. Исследованы возможные причинно-следственные связи этих изменений с климатическими индексами. Проведенные исследования позволили выявить, уточнить и дать количественную оценку современных тенденций и региональных особенностей межгодовой изменчивости термических условий в выделенных районах.

Ключевые слова: Берингово море, западная часть, прибрежные районы, термические условия, межгодовая изменчивость, тренды температуры, климатические индексы, корреляционные связи, разложение полей по ЭОФ, региональные особенности.

DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182.

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 // *Izv. TINRO*. — 2018. — Vol. 193. — P. 167–182.

The sea surface temperature (SST) variability in recent conditions of climate warming is analyzed for the coastal waters in the western Bering Sea and adjacent areas on the data of regular observations on coastal hydrometeorological stations in 1980–2016 and the data of NOAA_OI_SST_V2 reanalysis, taking into account the climate indices variations. The data series are analyzed using the methods of Empirical Orthogonal Functions, cluster analysis, and correlation analysis. Mean climatic trends are estimated for the air temperature as +0.27 °C/decade

* *Ростов Игорь Дмитриевич, кандидат географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: rostov@poi.dvo.ru; Дмитриева Елена Витальевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: e_dmitrieva@poi.dvo.ru; Воронцов Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, e-mail: vorov@meteo.ru.*

Rostov Igor D., Ph.D., head of laboratory, e-mail: rostov@poi.dvo.ru; Dmitrieva Elena V., Ph.D., senior researcher, e-mail: e_dmitrieva@poi.dvo.ru; Vorontsov Alexander A. Ph.D., head of laboratory, e-mail: vorov@meteo.ru.

and for SST as $+0.23\text{ }^{\circ}\text{C/decade}$; they explain 27 % and 35 % of the year-to-year variability, respectively. The warming patterns are not identical for all seasons and areas. The most rapid growth of the air temperature and SST is observed for warm season (on average $+0.36\text{ }^{\circ}\text{C/decade}$ and $+0.49\text{ }^{\circ}\text{C/decade}$). Both year-to-year fluctuations of SST and its climatic trend increase from south to north, the SST trend has increased from 0.11 to $0.32\text{ }^{\circ}\text{C/decade}$. Statistically significant climatic trends are found also in the changes of zonal and meridional components of wind velocity and certain indices of atmosphere circulation.

Key words: Bering Sea, western Bering Sea, coastal waters, thermal conditions, year-to-year variability, SST trend, index of atmosphere circulation, correlation, EOF analysis, regional features.

Введение

Процессы «глобального потепления», широко обсуждаемого в последние годы, оказывают значительное влияние на региональный климат Дальнего Востока. Происходящие изменения климатического режима отчетливо проявляются в последние 4 десятилетия в виде устойчивых тенденций и статистически значимых трендов межгодовых колебаний температуры воды, воздуха и других гидрометеорологических характеристик (Глебова и др., 2009; Ростов и др., 2017; WMO Statement..., 2017*). Эти изменения определяются крупномасштабными планетарными процессами, приводят к перестройке атмосферной циркуляции, смене типов атмосферных процессов, положения и выраженности сезонных центров действия атмосферы (Глебова, 2003; Пономарев и др., 2007; Шатилина и др., 2016; и др.).

Цель настоящей работы — уточнение тенденций, характеристик и возможных причинно-следственных связей межгодовых изменений термических условий в прибрежно-морских районах западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние 4 десятилетия (в период общего «потепления» климатических условий в дальневосточном бассейне).

Материалы и методы

Для анализа межгодовых изменений термических условий использовались проконтролированные данные 4 срочных измерений температуры воды и воздуха на сети из 12 ГМС Росгидромета (рис. 1, табл. 1) за период с 1980 по 2016 г. из архивов Госфонда (<http://meteo.ru/>). Номер станции на рис. 1 соответствует последним значениям 5-значного общероссийского кода данного пункта наблюдений. Выбранные для анализа ГМС охватывают систематическими наблюдениями большую часть прибрежной зоны западной части Берингова моря, юго-восточного побережья Камчатки и о. Беринга и позволяют получить сопоставимые оценки тенденций и особенностей межгодовой изменчивости этих климатических переменных. Отобранные ряды наблюдений на этих станциях содержали минимальное количество пропусков, которые были восстановлены с помощью статистических методов (Ростов и др., 2017).

По данным срочных наблюдений рассчитывались и корректировались величины средних месячных, сезонных и средних годовых значений, что обеспечивало получение сглаженных, относительно однородных рядов межгодовых изменений температуры воды (T_w) и приземной температуры воздуха (T_a). С учетом продолжительности ледового периода и особенностей внутригодового хода** были выделены условно теплый (июнь-октябрь) и условно холодный (ноябрь-апрель) сезоны (периоды года).

Также в работе были использованы данные реанализа поверхностной температуры (T_{wr}) на регулярной сетке, поля ветра и климатические (циркуляционные) индексы, позволяющие оценить влияние и вклад крупномасштабных процессов в межгодовую изменчивость термических характеристик исследуемого района: индекс тихоокеанского

* WMO Statement on the state of the global climate in 2016. Geneva: World Meteorological Organization, 2017. WMO-N 1189. 26 p.

** Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 10: Берингово море, вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. 300 с.

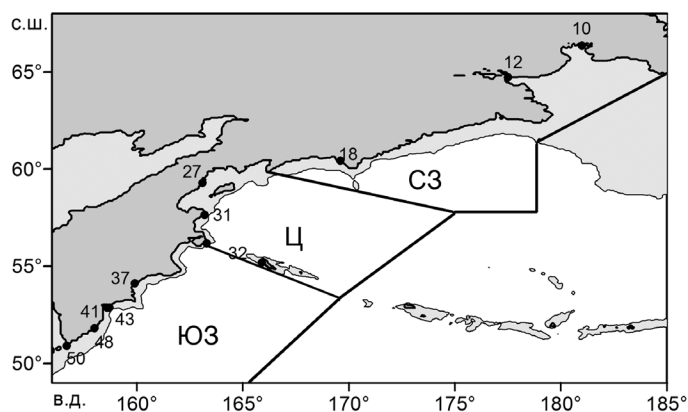


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдений и выделенных районов: C3 — северо-западный; Ц — центральный; ЮЗ — юго-западный

Fig. 1. Scheme of location for the coastal hydrometeorological stations and areas in the western Bering Sea: C3 — northern area; Ц — central area; ЮЗ — southern area

Таблица 1

Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воздуха на прибрежных ГМС за период наблюдений 1980–2016 гг.

Table 1

Year-to-year changes and long-term trends of annual mean air temperature at coastal stations for 1980–2016

№ ст.	Название	$\bar{T}_a$	$\bar{T}_{aM}$	σ^2	D	$T_{a\pm}$	КЛТ	КЛТм	КЛТт	КЛТх
10	Эгвекино́т (1980–2003 гг.)	–5,6	$\frac{-4,1}{-7,6}$	0,98	2	0,4	0,19	–	0,27	0,23
12	Анадырь (1980–2005 гг.)	–7,1	$\frac{-4,4}{-9,3}$	1,23	10	1,2	0,46	–	0,72	0,54
18	Алука (Олюторка)	–1,9	$\frac{0,3}{-4,1}$	0,91	16	1,3	0,36	$\frac{0,68}{7}$	0,54	0,17
27	Оссора (Карага)	–1,6	$\frac{0,4}{-3,0}$	0,63	10	0,8	0,23	$\frac{0,49}{8}$	0,27	0,19
31	Мыс Озерной	–0,2	$\frac{1,3}{-1,5}$	0,54	19	1,2	0,29	$\frac{0,57}{9}$	0,31	0,25
32	Мыс Африка	1,5	$\frac{2,8}{0,3}$	0,39	10	0,7	0,18	$\frac{0,42}{9}$	0,25	0,11
34	О. Беринга (Никольское)	2,8	$\frac{4,1}{1,0}$	0,32	28	1,0	0,28	$\frac{0,70}{8}$	0,44	0,13
37	Семлячки	2,5	$\frac{3,3}{1,2}$	0,25	28	0,9	0,24	$\frac{0,55}{8}$	0,37	0,15
41	Петропавловский маяк	1,6	$\frac{2,5}{0,3}$	0,30	43	1,2	0,33	$\frac{0,62}{8}$	0,42	0,28
43	Петропавловск-Камчатский	2,8	$\frac{3,7}{1,7}$	0,26	31	1,0	0,27	$\frac{0,56}{8}$	0,37	0,18
48	Бухта Водопадная	2,4	$\frac{3,4}{1,3}$	0,21	24	0,8	0,21	$\frac{0,48}{9}$	0,31	0,14
50	Мыс Лопатка	–	–	–	–	1,3	0,37	$\frac{0,94}{7}$	0,68	0,07
	Все станции	–	–	–	27	1,0	0,27	$\frac{0,62}{8}$	0,36	0,18

Примечания. $\bar{T}_a$ — среднее значение температуры, °C; $\bar{T}_{aM}$ — экстремальные величины среднегодовых изменений (над чертой — максимальное значение, под чертой — минимальное); σ^2 — дисперсия T_a ; D — вклад тренда в суммарную дисперсию, %; $T_{a\pm}$ — тренд за 37 лет; КЛТ — коэффициент наклона линейного тренда, °C/10 лет; КЛТм — максимальная величина этого коэффициента (над чертой — значение, под чертой — месяц); КЛТт, КЛТх — коэффициент тренда соответственно для теплого и холодного сезонов. Жирным шрифтом выделены оценки значимого тренда, прочерк — отсутствие сопоставимых данных.

декадного колебания (PDO), индекс южного (SOI) и арктического колебаний (АО), региональный индекс летнего охотоморского максимума (ОКН), западно-тихоокеанский (WP) и северо-тихоокеанский (NPI) индексы (сайты NOAA <http://www.cpc.ncep.noaa.gov> и <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/getpage.pl>).

Тренды оценивались для временных рядов, включающих среднегодовые значения наблюдаемых параметров и их аномалий, определяемых как отклонение от средней величины за все годы 30-летнего периода 1984–2013 гг. В качестве критического значения коэффициента корреляции на 5 %-ном уровне значимости линейного тренда была принята величина 0,33 (коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,11$).

Исследование структуры межгодовых изменений температуры воды проводилось с использованием метода разложения множества рядов (полей) на главные компоненты, или эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Районирование и выделение акваторий, относительно обособленных по характеру климатических изменений, проводилось по трем главным компонентам ЭОФ методами кластерного анализа (Ростов и др., 2017).

Результаты и их обсуждение

Общие характеристики межгодовой изменчивости температуры воздуха и воды в прибрежной зоне западной части Берингова моря и юго-востока Камчатки

Общее представление о характере и тенденциях межгодовых изменений температуры воздуха в исследуемом районе дают количественные оценки, приведенные в табл. 1.

Среднегодовые значения температуры воздуха на станциях возрастают вдоль побережья с севера на юг от минус 7,1 °C в Анадырском заливе до плюс 2,8 °C в районе Петропавловска-Камчатского и о. Беринга, а размах и дисперсия межгодовых колебаний, напротив, увеличиваются в 2–3 раза в противоположном направлении. На всех станциях тренды межгодовых изменений среднегодовых значений температуры положительны. Величины коэффициентов наклона линейного тренда изменялись от 0,18 до 0,46 °C/10 лет, что говорит о повсеместном возрастании температуры воздуха за последние 37 лет на величину от 0,4 до 1,4 °C (в среднем на 1,0 °C). Величина вклада тренда в суммарную дисперсию T_a у южной части побережья (24–43 %) больше, чем у северной (2–19 %). Обобщенно по всем ГМС оценки тренда T_a в теплый сезон в 1,3 раза превосходят среднегодовые, а наибольшие величины коэффициентов наклона линейного тренда (до 0,9 °C/10 лет) в сопоставимых по продолжительности рядах наблюдений наблюдались в июле-августе (табл. 1). В холодный сезон значимый положительный тренд отмечался только на одной ГМС — Петропавловский маяк.

На рис. 2 приведены обобщенные кривые временного хода среднегодовых величин аномалий и накопленных аномалий температуры воздуха и воды по данным всех прибрежных ГМС. Колебания аномалий температуры отражают чередование теплых и холодных лет в рядах наблюдений с интервалом 2–7 лет, а интегральные кривые накопленных аномалий — низкочастотные составляющие и отдельные периоды в межгодовом ходе температуры.

В начальный период наблюдений преобладали отрицательные аномалии температуры воздуха. В середине периода, до 2004 г., наблюдалось резкое возрастание амплитуды колебаний T_a с абсолютным максимумом в 1996 г., обусловленным аномальным потеплением в холодный период года. В последующий период происходил устойчивый рост суммы положительных аномалий температуры воздуха (рис. 2, а, б). Обобщенные по данным ГМС экстремально высокие среднегодовые величины аномалий температуры ($\Delta T_a \geq 1,5$ °C) отмечались в 1995, 1996, 2003 и 2014 гг., а наименьшие ($\Delta T_a \leq 1,0$ °C) — в 1985–1988, 1993 и 1998–2000 гг. Совокупно по всем ГМС величина статистически значимого линейного тренда изменений температуры воздуха составила 0,27 °C/10 лет (в теплый период 0,36 °C/10 лет), а величина вклада тренда в суммарную дисперсию $D = 27$ % (в теплый период 38 %). В прибрежной зоне Охотского

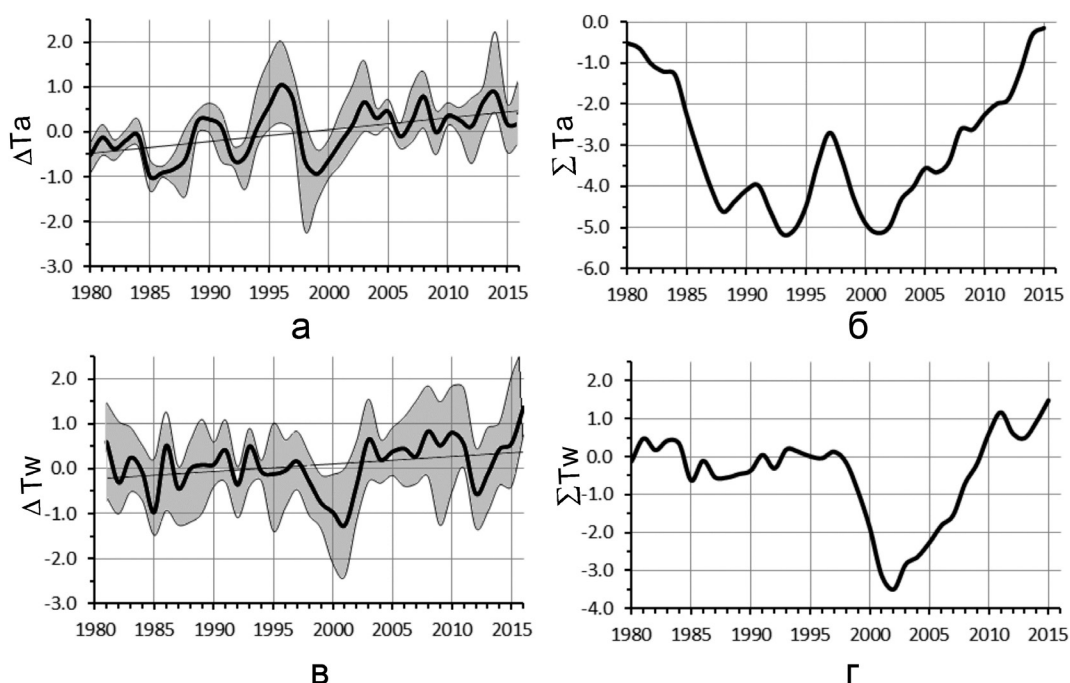


Рис. 2. Межгодовая изменчивость аномалий и накопленных аномалий температуры воздуха (а, б) (среднегодовые) и температуры воды (теплый период) (в, г) на ГМС. Показан диапазон колебаний и линия тренда

Fig. 2. Year-to-year variability of anomalies and accumulated anomalies at coastal stations: а, б — annual mean air temperature; в, г — SST in the warm season. Range of fluctuations and linear climatic trends are shown

и северной части Японского морей эти величины (среднегодовые) несколько выше: соответственно $0,34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, $D = 43\%$ и $0,32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, $D = 34\%$ (Ростов и др., 2017). В теплый период максимум 1996 г. в ходе аномалий температуры воздуха выражен слабо, а в ходе аномалий температуры воды он совсем отсутствует (рис. 2, в, г). Максимальная величина отрицательных аномалий ($\Delta T_w = -2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдалась в 2001 г.

Количественные оценки межгодовых изменений температуры воды в исследуемом районе в теплый период года по данным 9 ГМС представлены в табл. 2.

Как следует из данных табл. 2, на большинстве станций отмечаются положительные тренды величиной от $0,15$ до $0,40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. На двух станциях, одна из которых расположена в мелководной бухте Карагинского залива (Оссора), а другая — у его южной границы (мыс Африка), обнаружены статистически незначимые отрицательные тренды. Максимальные положительные тренды наблюдались в августе и сентябре, а в холодный период значимые тренды отсутствовали. В среднегодовом ходе по имеющимся сопоставимым данным отмечались положительные тренды от $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ (Петропавловск-Камчатский) до $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ (о. Беринга).

Межгодовые флюктуации температуры воды и воздуха на большинстве ГМС характеризуются сильными корреляционными связями ($r = 0,6\text{--}0,8$). На некоторых участках побережья из-за нарушения естественного процесса прогрева и охлаждения водной поверхности они слабее (табл. 2). При осреднении данных по всем ГМС оценка статистически значимого КЛТ изменений T_w в теплый сезон составила $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, а величина вклада тренда в суммарную дисперсию — 10% . В прибрежной зоне Охотского моря эти величины значительно выше: $0,34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, $D = 50\%$ (Ростов и др., 2017). В отличие от температуры воздуха данные наблюдений над температурой воды на отдельных ГМС отражают в основном локальные особенности термического режима отдельных участков прибрежных акваторий, включая мелководные бухты, которые зачастую изолированы от прилегающих районов моря.

Таблица 2

Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воды в теплый период на прибрежных ГМС за период наблюдений 1980–2016 гг.

Table 2

Year-to-year changes and long-term trends of SST in warm season at coastal stations in 1980–2016

№ ст.	Название	σ^2	D	$T_w \pm$	КЛТ _т	КЛТ _м	г
10	Эгвекино́т	0,89	6	0,7	0,20	<u>0,34</u> 9	0,3
12	Анадырь (1980–2000 гг.)	0,57	–	0,2	0,15	<u>0,48</u> 9	0,8
18	Апука (Олюторка)	0,54	7	0,7	0,18	<u>0,31</u> 8	0,7
27	Оссора (Карага)	0,75	0	–0,1	–0,02	<u>0,19</u> 9	0,5
32	Мыс Африка	0,46	–1	–0,2	–0,05	<u>0,31</u> 8	0,4
34	О. Беринга (Никольское)	0,71	25	1,4	0,40	<u>0,67</u> 8	0,8
37	Семлячки	0,80	10	1,0	0,27	<u>0,52</u> 8	0,6
41	Петропавловский маяк	0,55	5	0,6	0,17	<u>0,36</u> 8	0,4
43	Петропавловск-Камчатский	–	–	1,0	0,28	<u>0,68</u> 8	0,7

Примечания. σ^2 — дисперсия T_w ; D — вклад тренда в суммарную дисперсию, %; $T_w \pm$ — тренд за 37 лет; КЛТ_т — коэффициент наклона линейного тренда в теплый сезон, °C/10 лет; КЛТ_м — максимальная величина этого коэффициента (над чертой — значение, под чертой — месяц); г — коэффициент корреляции температуры воды и воздуха на станции. Жирным шрифтом выделены оценки значимого тренда, прочерк — отсутствие сопоставимых данных.

Тенденции межгодовой изменчивости температуры воды в акваториях, прилегающих к прибрежной зоне

По данным реанализа полей среднегодовых аномалий температуры воды ΔT_w в западной части Берингова моря и сопредельной области северо-западной части Тихого океана (СЗТО) методами кластерного анализа выделены 7 районов, три из которых — северо-западный (СЗ), центральный (Ц) и юго-западный (ЮЗ) — расположены в акваториях, прилегающих к прибрежной зоне (см. рис. 1). В северо-западный район входят Анадырский залив, наваринский и корякский шельф, западная часть Алеутской котловины; в центральный — шельф Карагинского и Олюторского заливов и Командорская котловина, расположенные в Беринговом море; в юго-западный, расположенный в СЗТО, — Камчатская впадина и Командорские острова.

На рис. 3 сопоставлены кривые временного хода среднегодовых аномалий и накопленных аномалий температуры воды в центрах кластеров выделенных районов. В каждом районе наблюдается постепенное увеличение температуры по сравнению с нормой базового периода. Корреляционная связь межгодовых колебаний температуры в удаленных районах (СЗ и ЮЗ) статистически значима ($r = 0,40$), но для соседних (СЗ/Ц и ЮЗ/Ц) она значительно теснее ($r = 0,80$ и $0,65$). Величина коэффициента корреляции между изменениями T_w в теплый и холодный периоды значима только для районов СЗ и Ц.

В табл. 3 представлены количественные оценки тенденций и амплитудных характеристик вариаций температуры воды в центрах кластеров исследуемых районов. Как следует из данных, в направлении с юга на север наблюдается возрастание дисперсии и трехкратное увеличение скорости роста среднегодовой температуры воды:

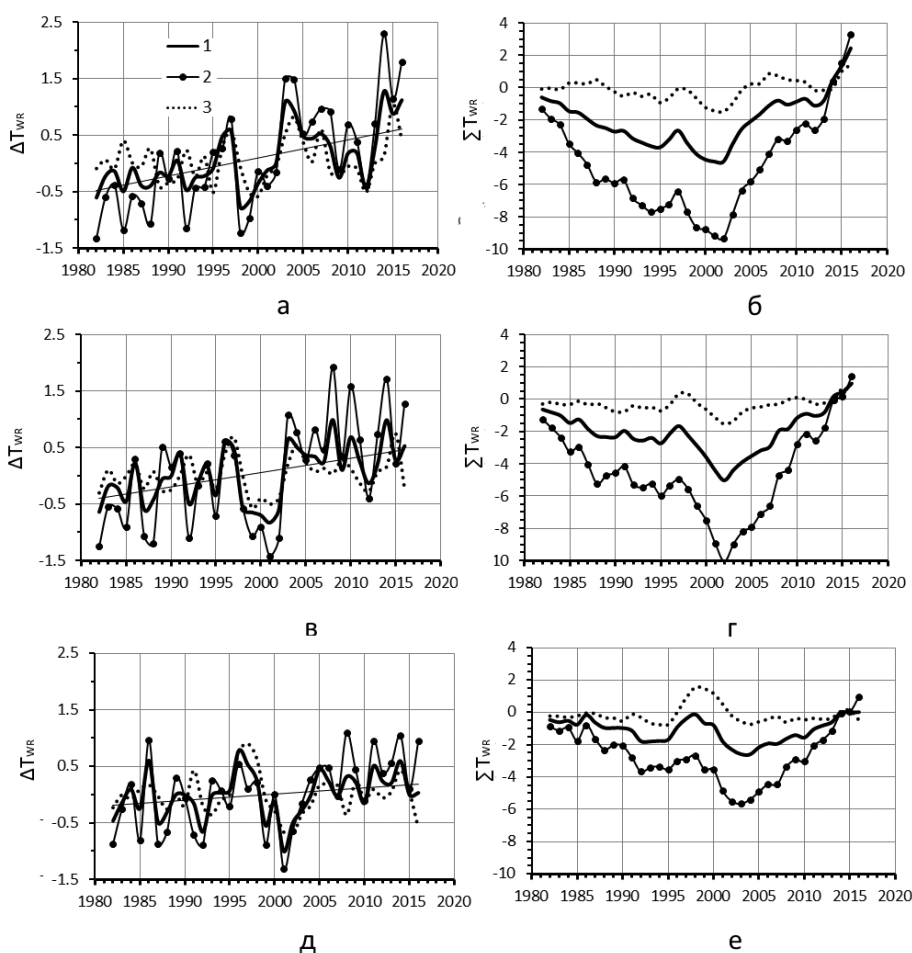


Рис. 3. Межгодовая изменчивость аномалий ΔT_{wt} и накопленных аномалий $\Sigma \Delta T_{wt}$ температуры воды по районам СЗ (а, б), Ц (в, г) и ЮВ (д, е): 1 — среднегодовые значения; 2, 3 — значения за теплый и холодный сезоны. Показан линейный тренд

Fig. 3. Year-to-year variability of SST anomalies and accumulated anomalies, by areas: а, б — northern part of the western Bering Sea; в, г — central part of the western Bering Sea; д, е — southern part of the western Bering Sea; 1 — annual means; 2 — means for warm season; 3 — means for cold season. Linear trend is shown

Таблица 3

Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воды в выделенных районах за период наблюдений 1982–2016 гг.

Table 3

Year-to-year changes and long-term trends of SST in certain areas for the 1982–2016

Район	σ^2	D	$T_{wt} \pm$	КЛТ	КЛТ _м	КЛТ _т	КЛТ _х
СЗ	0,29	38	1,1	0,32	<u>0,78</u> 9	0,64	0,08
Ц	0,25	28	0,9	0,25	<u>0,76</u> 8	0,52	0,06
ЮЗ	0,15	8	0,4	0,11	<u>0,56</u> 8	0,31	0,01
Вся акватория	0,17	35	0,8	0,23	<u>0,70</u> 8	0,49	0,04

Примечания. σ^2 — дисперсия T_{wt} ; D — вклад тренда в суммарную дисперсию, %; $T_{wt} \pm$ — тренд за 35 лет; КЛТ — коэффициент наклона линейного тренда, °C/10 лет; КЛТ_м — максимальная величина этого коэффициента (над чертой — значение, под чертой — месяц); КЛТ_т, КЛТ_х — коэффициент тренда для теплого и холодного сезонов. Жирным шрифтом выделены оценки значимого тренда.

от 0,11 °C/10 лет (ЮЗ) до 0,32 °C/10 лет (СЗ). При этом величина вклада трендовой составляющей в суммарную дисперсию возрастала в том же направлении от 8 до 38 %. За исследуемый период среднегодовая температура воды в этих районах возросла от 0,4 до 1,1 °C.

В теплый период года во всех районах коэффициенты линейного тренда в 2–3 раза больше по сравнению со среднегодовыми и достигают максимальных положительных значений (до 0,6–0,8 °C/10 лет) в августе-сентябре. В холодный сезон тренды малы и статистически незначимы. В среднем по всему району исследований температура воды увеличивалась на величину 0,23 °C/10 лет, а в теплый период — на 0,49 °C/10 лет. Можно предположить, что быстрое потепление на севере исследуемой области во многом обусловлено поступлением в северо-западную часть Берингова моря более теплых, чем в прежние годы, воздушных масс из арктических районов. Предварительный анализ данных наблюдений на ГМС в восточном секторе Арктики показал, что величина положительных трендов температуры воздуха на станциях, расположенных на побережье Восточно-Сибирского и Чукотского морей, примерно в 2–3 раза превосходит соответствующие оценки, приведенные в табл. 1. Другим фактором потепления может быть увеличение переноса более теплых тихоокеанских вод Центрально-Беринговоморским (Склоновым) течением при усилении отдельных звеньев циклонического круговорота Берингова моря (Андреев, Жабин, 2015).

Анализ интегральных кривых аномалий $\sum \Delta T_{\text{вр}}$, накопленных за исследуемый период (рис. 3, б, г, е), позволяет выделить и сопоставить низкочастотные составляющие межгодового хода температуры на различных временных интервалах в выделенных районах. Интервалы спада этих кривых отражают процесс выхолаживания вод, стабилизации — варьирования около средних значений, а интервалы роста — тренд накопления тепла в результате совокупного воздействия разнообразных адвективных и климатических факторов. Хорошо заметны различия в интенсивности (размах колебаний) и характере протекания (синхронности колебаний) этого процесса в выделенных районах. Процесс накопления отрицательных аномалий завершается в 2002–2003 гг., после чего во всех районах начинается фаза потепления.

Исходя из величины соотношения среднегодовых аномалий $\Delta T_{\text{вр}}$ и их стандартных отклонений (Карпова, Шатилина, 2000) были выделены годы, соответствующие 5 режимам теплового состояния вод: аномально холодные, холодные, средние (нормальные), теплые и аномально теплые. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Годы с наблюдениями аномальных режимов теплового состояния вод в выделенных районах

Table 4

Years with abnormal regime of thermal conditions in certain areas of the western Bering Sea

Режим вод	Северо-западный район	Центральный район	Юго-западный район
Аномально холодный	—	2001	1992, 2001
Холодный	1982, 1985, 1987, 1988, 1992, 1998–2000, 2012	1982, 1985, 1987, 1988, 1992, 1995, 1998–2000, 2002, 2012	1982, 1985, 1987, 1988, 1999, 2002, 2012
Теплый	1996, 1997, 2005–2008, 2013	1991, 1996, 1997, 2003–2006, 2010, 2011, 2015, 2016	1997, 1998, 2005, 2006, 2009, 2011–2013
Аномально теплый	2003, 2004, 2014–2016	2008, 2014	1986, 1996, 2014

В многолетнем ходе температуры воды в последнее десятилетие рассматриваемого периода на фоне чередования «холодных» и «теплых» лет хорошо выражена общая тенденция потепления вод.

Анализ структуры межгодовых изменений температуры воды

Отмеченные особенности пространственно-временной изменчивости поля температуры воды отражают результат влияния и взаимодействия большого числа разно-

масштабных процессов, происходящих в море и атмосфере. Для выявления наиболее важной информации о структуре этого поля по данным реанализа были вычислены ЭОФ разложения среднегодовых и сезонных колебаний аномалий $\Delta T_{\text{вр}}$ в западной части Берингова моря и прилегающих районов СЗТО. Выявлено, что первые три моды ЭОФ аккумулируют 72–76 % дисперсии межгодовых колебаний температуры воды и дают наиболее полное представление об особенностях структуры межгодовой изменчивости термических полей исследуемого района (табл. 5).

Таблица 5

Вклад первых трех мод ЭОФ разложения полей аномалий температуры
в дисперсию межгодовых изменений, %

Table 5

Contribution of the first three EOF modes in dispersion of SST year-to-year variability, %

ЭОФ	C-1	C-2	C-3	ΣC
Среднегодовые	51	19	5	75
Теплый сезон	41	28	7	76
Холодный сезон	52	12	9	73

Примечание. Жирным шрифтом выделены оценки значимого тренда.

Первая мода (C-1) описывает 51 % общей дисперсии вариаций среднегодовых значений $\Delta T_{\text{вр}}$, а в теплый и холодный сезоны — 41 и 52 %. Статистически значимые положительные тренды в ходе временных рядов коэффициентов разложения выделялись только для второй моды (в теплый сезон и для среднегодовых значений $\Delta T_{\text{вр}}$) и третьей моды (холодный сезон).

В целом для временных колебаний температуры характерна слабая пространственная связанность, более тесная в зональном направлении. Поле пространственного распределения коэффициентов первых трех мод ЭОФ представлено как положительными, так и отрицательными значениями, что свидетельствует о несинхронности колебаний температуры и различной интенсивности процессов теплоотдачи, аккумуляции и адвекции тепла в различных участках акватории моря (рис. 4). Они обусловлены различиями климатических условий, гидрологического режима выделенных районов и определяются множеством факторов, одним из которых является несинхронность и даже противофазность гидрометеорологических процессов, протекающих в восточной и западной частях Берингова моря*.

В теплый период года в распределении коэффициентов первой моды (41 % общей дисперсии) выделяются две области противофазных колебаний — на северо-востоке и юго-западе рассматриваемой акватории. Первая из них полностью включает район СЗ с входящим в него участком берингоморского шельфа, а вторая — районы Ц и ЮЗ, расположенные в глубоководной части акватории. Граница между этими областями проходит южнее берингоморского шельфа примерно вдоль границы максимального распространения дрейфующего льда. Можно предположить, что положение этих областей в основном связано с различием скорости процессов теплоотдачи (выхолаживания) и аккумуляции тепла в шельфовом и глубоководном участках акватории. Это обуславливает существование очагов аномалий температуры воды и воздуха различного знака (Устинова и др., 2008; Хен и др., 2008) и отражает региональные особенности термического и динамического воздействия муссонной атмосферной циркуляции и различия гидрологических условий северо-восточной и юго-западной частей моря.

В пространственном распределении коэффициентов второй моды в этот же сезон (28 % дисперсии) прослеживается синхронность вариаций температуры в пределах всего побережья и большей части прилегающих районов. За пределами этой области, в открытой части акватории моря, одновременные изменения температуры происходят в противофазе. Эта мода может быть связана с влиянием локальных синоптических процессов и формированием зон преобладающих траекторий и максимальной по-

* Гидрометеорология... (1999).

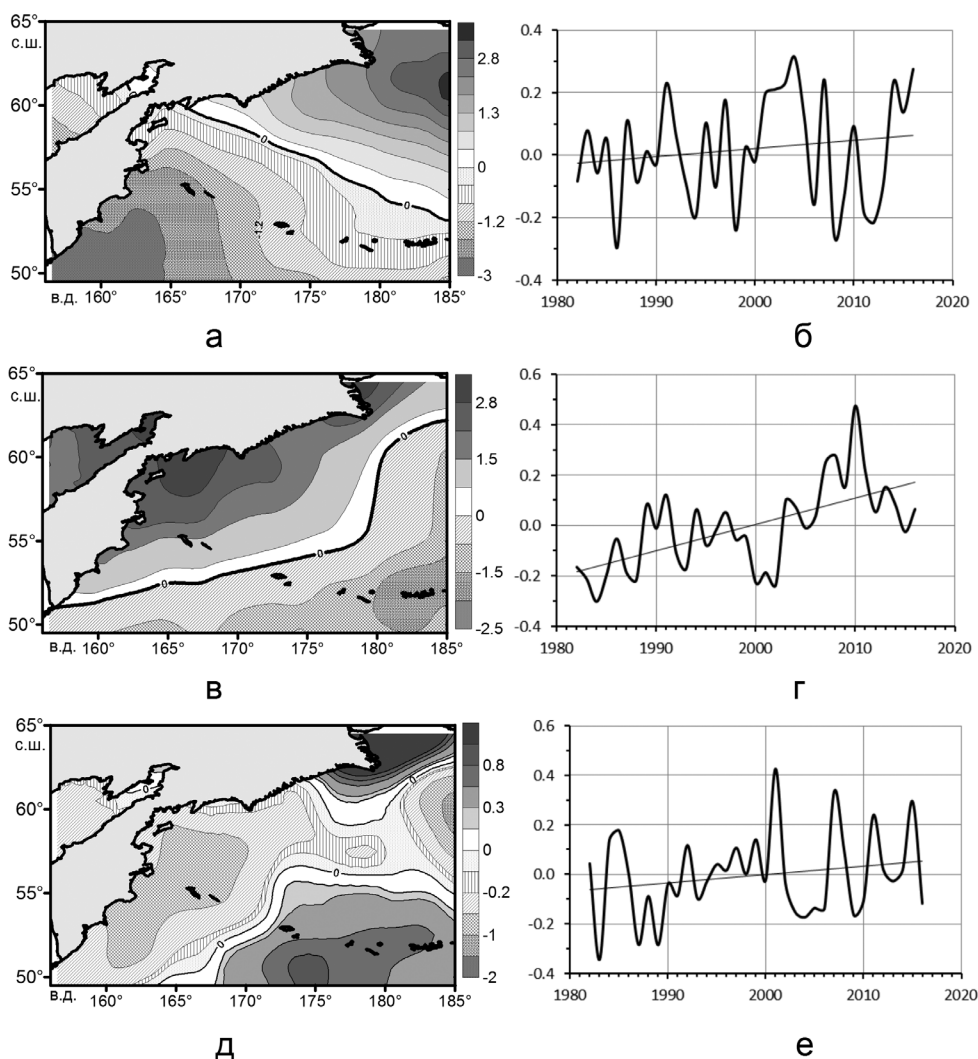


Рис. 4. Пространственное распределение первой (а), второй (в) и третьей (д) мод эмпирических ортогональных функций и временной ход (б, г, е) соответствующих коэффициентов разложения по эмпирическим ортогональным функциям аномалий поля температуры воды в теплый период года

Fig. 4. Spatial distribution of the first (а), second (в) and third (д) EOF modes for SST anomalies in warm season and temporal variability of their temporal coefficients (б, г, е)

вторяемости циклонов, приуроченных к крупномасштабным атмосферным фронтам (Гидрометеорология..., 1999*; Глебова, 2003; Устинова и др., 2008). Третья мода (7 % дисперсии) характеризует синфазные колебания в поле температуры небольшой амплитуды в зональном и меридиональном направлениях по отношению к центральной части Алеутской котловины и может отражать региональные особенности динамики вод моря и перераспределения трансформирующихся тихоокеанских вод по акватории (Hughes et al., 1974).

Общие особенности структуры поля температуры, описываемые первой и второй модами в теплый период года, характерны и для холодного сезона. В это время происходит смещение к северу границы, разделяющей области положительных и отрицательных значений коэффициентов ЭОФ и уменьшение дисперсии колебаний температуры воды. Поле же третьей моды в холодный период (9 % общей дисперсии

* Гидрометеорология... (1999).

колебаний) существенно перестраивается. В это время года область положительных значений коэффициентов ЭОФ распространяется на всю акваторию Алеутской котловины и южнее, а отрицательных, противофазных — охватывает все прибрежные районы Чукотки и восточной Камчатки. Межгодовые вариации температуры воды и воздуха в выделенных районах значимо коррелируют с колебаниями временных коэффициентов главным образом первой и второй мод ЭОФ (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты корреляции между рядами межгодовых колебаний аномалий температуры воздуха ΔT_a , воды ΔT_{wt} в выделенных районах и временных коэффициентов первых мод эмпирических ортогональных функций полей аномалий ΔT_{wt} в среднем за год, в теплый и холодный сезоны

Table 6

Coefficients of correlation between year-to-year fluctuations of air temperature and SST in the northern, central, and southern parts of the western Bering Sea and temporary coefficients of the first EOF modes of SST (annual mean and average for warm and cold seasons)

Показатель	Северо-западный район			Центральный район			Юго-западный район		
	Ср.	Тепл.	Хол.	Ср.	Тепл.	Хол.	Ср.	Тепл.	Хол.
ΔT_{wt}									
С-1	0,4	0,5	0,5	-0,1	0,0	0,0	-0,5	-0,3	-0,5
С-2	0,7	0,6	0,5	0,7	0,8	0,6	0,2	0,5	0,0
С-3	0,1	0,0	0,3	0,0	-0,2	0,1	-0,1	0,0	-0,1
ΔT_a									
С-1	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3
С-2	0,6	0,6	0,2	0,6	0,5	0,3	0,6	0,5	0,3
С-3	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,2	-0,1	0,0	-0,2	0,0

Примечание. Значимые величины выделены жирным шрифтом.

В этих связях во временном ходе аномалий температуры воды и коэффициентов первой моды во все сезоны года отчетливо проявляется противофазность колебаний в районе С3 по отношению к району ЮЗ (рис. 4, а). Корреляционные связи между изменениями аномалий ΔT_{wt} и коэффициентов второй моды характеризуются только положительным знаком. В холодный период они ослабевают, а на юге района полностью отсутствуют. Временная изменчивость коэффициентов третьей моды слабо коррелирована с колебаниями ΔT_{wt} только в районе С3 в холодный период года. Как отмечалось выше, статистически значимые положительные тренды температуры воды (среднегодовые значения и в теплый сезон) присутствовали во всех выделенных районах. В вариациях коэффициентов ЭОФ такие тренды выделялись только в изменениях второй (среднегодовые и в теплый сезон) и третьей мод (холодный сезон).

В отличие от температуры воды корреляционные связи между временными изменениями коэффициентов мод С1–С3 и колебаниями температуры воздуха на прибрежных ГМС, расположенных в выделенных районах, выражены главным образом только для второй моды в теплый период года, что проявляется и в среднегодовых значениях коэффициентов корреляции (табл. 6).

Корреляционные связи между характеристиками термических условий и атмосферными процессами

Отмеченные особенности пространственно-временной изменчивости поля температуры — результат комбинации различных факторов и сложного взаимодействия процессов глобального, регионального и локального масштабов. В условиях глобального потепления причинами формирования областей положительных аномалий приземной температуры воздуха и воды в дальневосточном регионе являются изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции, расположения и выраженности центров действия атмосферы, а также интенсивности и соотношения зональных и меридиональных

переносов в атмосфере. Эти изменения характеризуются рядом признаков и отражаются в отдельных циркуляционных показателях, в частности в колебаниях климатических индексов (Смирнов, Воробьев, 2002; Хен и др., 2008; Котляков и др., 2015; Ростов и др., 2017; и др.). Был проведен взаимный корреляционный анализ временных рядов температуры воды и воздуха, коэффициентов мод ЭОФ разложения полей аномалий $\Delta T_{\text{вр}}$ и ветра, а также индексов атмосферной циркуляции, характеризующих динамику климатической системы северо-западной части Тихого океана.

Произошедшие в результате климатического сдвига нарушения барического поля и сезонного режима региональной муссонной циркуляции выражены в изменениях ветрового режима в холодный и теплый сезоны года (рис. 5, а–г). Поле приводного ветра существенно неоднородно и характеризуется значительной завихренностью. Приведенные на рис. 5 (д, е) кривые указывают на тенденции некоторого ослабления зимних муссонных ветров северных румбов и усиления летнего муссона при статистически значимых трендах возрастания скорости ветра западных и южных румбов. Величина тренда скорости ветра западных направлений за теплый период года составила 0,6 м/с, а его вклад в суммарную дисперсию — 15 %. В ряде работ причина потепления в Северной Евразии связывается с усилением межширотного обмена при ослаблении зонального переноса в средней тропосфере (Попова, Шмакин, 2010; Попова, 2014; и др.).

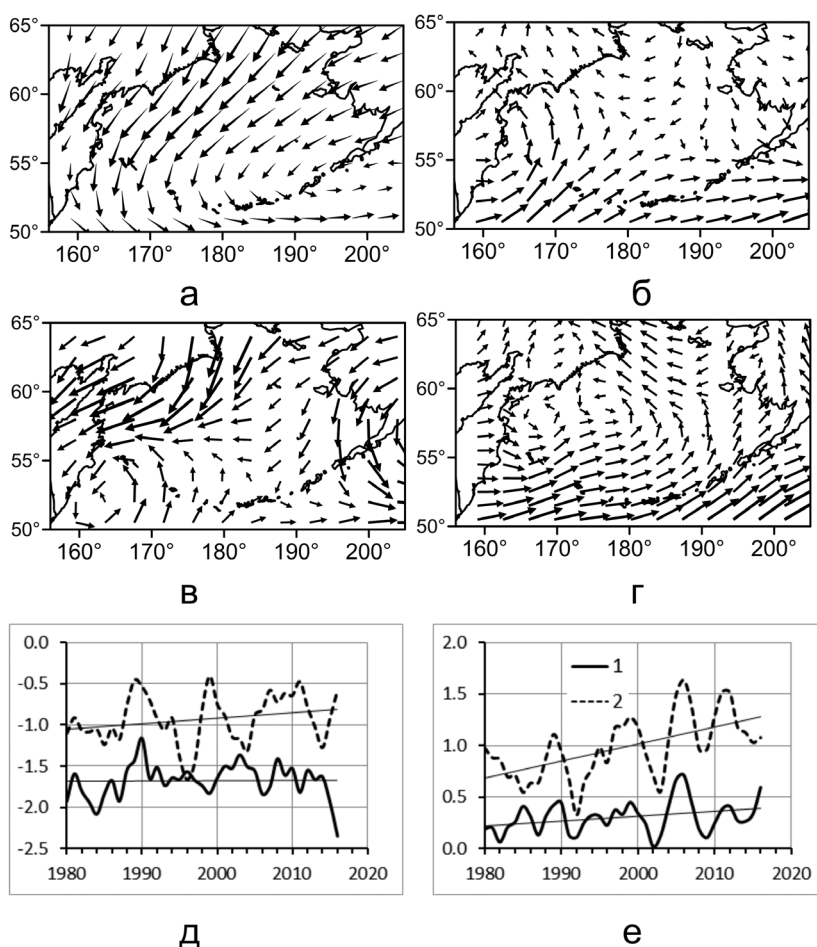


Рис. 5. Поля приземного ветра в холодный (а, в) и теплый (б, г) сезоны года в начале (1983 г.) и второй половине (2011 и 2016 гг.) периода наблюдений и сглаженные 3-летним скользящим средним меридиональная V (1) и зональная U (2) компоненты скорости ветра в холодный (д) и теплый (е) сезоны

Fig. 5. Wind fields at the sea surface in cold (а, в) and warm (б, г) seasons in 1983 and 2011, 2016 and meridional (1) and zonal (2) components of wind velocity in cold (д) and warm seasons (е) smoothed by 3-years averaging

Ветровое воздействие оказывает влияние как на процессы переноса тепла в системе течений всего Субарктического круговорота, так и на характер теплообмена между морем и атмосферой, что приводит к формированию очагов аномалий температуры воды и воздуха в различных районах моря. Межгодовая изменчивость полей атмосферного давления и ветра связана с состоянием основных сезонных центров действия атмосферы, их взаимодействиями и региональными особенностями проявления, а также с характером циклонической деятельности, приуроченной к крупномасштабным атмосферным фронтам*. При этом циклические колебания скорости ветра (рис. 5, д, е) примерно соответствуют периоду межгодовых изменений повторяемости холодных и теплых синоптических типов (Глебова, 2005). Из-за существенной неоднородности структуры поля ветра коэффициенты корреляции между колебаниями температуры воздуха и воды в отдельных районах с меридиальной и зональной компонентами V и U, осредненными по всему морю, относительно невелики и значимы только для отдельных сезонов (табл. 7).

Таблица 7
Коэффициенты корреляции между рядами временных колебаний меридиональной (V) и зональной (U) компонент поля ветра и межгодовых аномалий температуры воды и воздуха в выделенных районах

Table 7
Coefficients of correlation between temporary changes of meridional (V) and zonal (U) components of wind velocity and year-to-year anomalies of SST and air temperature, by areas

Показатель	Северо-западный район			Центральный район			Юго-западный район		
	Ср.	Тепл.	Хол.	Ср.	Тепл.	Хол.	Ср.	Тепл.	Хол.
T _a									
V	0,2	0,0	0,3	0,3	0,1	0,4	0,2	0,1	0,4
U	-0,2	0,1	-0,6	-0,2	0,3	-0,6	0,1	0,5	-0,3
T _w									
V	0,1	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,3	0,1
U	-0,1	0,2	-0,3	-0,1	0,3	-0,5	-0,2	0,3	-0,3

Примечание. Значимые величины выделены жирным шрифтом.

В поле T_a корреляционные связи проявляются во всех районах с колебаниями как меридиональной, так и зональной компонент скорости ветра. В период зимнего муссона ослабление ветров северной четверти сопровождается ростом температуры воздуха. Колебания температуры воды коррелированы с изменениями зональной компоненты скорости в двух районах — СЗ и Ц — только в холодный период. При усилении западного переноса в холодный период года, когда Аляскинское течение ослабевает и поступление более теплых океанических вод сокращается, происходит понижение температуры воды в районах СЗ и Ц Берингова моря. В теплый период года усиление ветров западной четверти (см. рис. 4, е) сопровождается ростом температуры воздуха в районах Ц и ЮЗ (табл. 7).

Для уточнения характеристик пространственно-временной структуры поля ветра были вычислены ЭОФ вариаций компонент V и U скорости. Первые три моды характеризуют пространственное положение основных энергоактивных зон в пределах акватории, где вклад изменчивости поля ветра в суммарную дисперсию достигает 71–78 %. Отмеченные выше тенденции межгодовых изменений поля ветра (рис. 5, д, е) проявляются в наличии статистически значимых положительных трендов во временном ходе коэффициентов ЭОФ разложения в теплый период года. Анализ корреляционных связей межгодовых колебаний полей ветра и температуры воды показал, что они статистически значимы только для первой (все районы), а также первой и второй (районы Ц и ЮЗ) мод ЭОФ разложения V и U компонент скорости

* Гидрометеорология... (1999).

ветра. Интерпретация этих связей сложна и неоднозначна, она требует рассмотрения конкретных синоптических ситуаций и самостоятельного анализа.

Рассмотрим результаты корреляционного анализа связей межгодовых колебаний температуры воды и воздуха, характеристик поля ветра с вариациями региональных климатических (циркуляционных) индексов. В рассматриваемый период в ходе межгодовых изменений климатических индексов присутствовали статистически значимые положительные и отрицательные трендовые составляющие (табл. 8), которые указывают на произошедшую в конце 90-х — начале 2000-х гг. смену режима и ослабление крупномасштабной атмосферной циркуляции в северотихоокеанском регионе (Ростов и др., 2017).

Таблица 8

Коэффициенты корреляции межгодовых колебаний климатических индексов с вариациями компонент скорости ветра, аномалий температуры воздуха и воды в выделенных районах и коэффициентов временных рядов первых мод ЭОФ поля аномалий $T_{\text{вр}}$

Table 8

Coefficients of correlation between year-to-year changes of climatic indices, components of wind velocity, SST and air temperature anomalies and EOF temporal coefficients of SST anomalies. Significant values are shown by bold numerals

Показатель	PDO	NPI	WP	SOI	AO	ОКН
Теплый сезон (июль)						
КЛТ	-0,5	—	-0,3	0,2	-0,3	-0,8
V	-0,2	—	0,6	0,2	0,3	-0,3
U	-0,5	—	0,4	0,4	0,3	-0,5
T_a (C3)	-0,4	—	-0,5	0,4	0,2	-0,3
T_a (Ц)	-0,3	—	-0,4	0,4	-0,2	-0,4
T_a (ЮЗ)	-0,4	—	-0,4	0,4	-0,2	-0,3
$T_{\text{вр}}$ (C3)	0,0	—	-0,4	0,3	-0,3	-0,4
$T_{\text{вр}}$ (Ц)	-0,2	—	-0,3	0,3	-0,1	-0,4
$T_{\text{вр}}$ (ЮЗ)	-0,2	—	-0,4	0,2	-0,1	-0,3
C-1	0,4		-0,3	-0,2	-0,1	0,0
C-2	-0,4		-0,3	0,4	0,0	-0,6
C-3	-0,3		0,1	0,0	-0,2	-0,3
Холодный сезон (февраль)						
КЛТ	-0,3	0,8	0,5	0,3	0,1	—
V	-0,4	0,7	0,3	0,4	0,4	—
U	-0,3	0,6	0,6	0,1	0,3	—
T_a (C3)	0,1	0,1	-0,5	0,1	0,0	—
T_a (Ц)	0,0	0,2	-0,6	0,2	0,0	—
T_a (ЮЗ)	0,0	0,3	-0,5	0,2	0,1	—
$T_{\text{вр}}$ (C3)	0,6	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	—
$T_{\text{вр}}$ (Ц)	0,5	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	—
$T_{\text{вр}}$ (ЮЗ)	0,0	0,0	-0,2	0,0	-0,1	—
C-1	0,6	-0,4	0,1	-0,1	-0,1	
C-2	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,1	
C-3	0,2	0,0	0,1	-0,3	-0,3	

Примечания. КЛТ — коэффициент линейного тренда, отн. ед./10 лет. Прочерк — отсутствие оценок из-за сезонности центров действия атмосферы. C3, Ц, ЮЗ — обозначения выделенных районов. Жирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

В теплый сезон, когда наблюдаются статистически значимые положительные тренды межгодовых вариаций температуры воды и воздуха, в ходе рассматриваемых климатических индексов произошли следующие изменения.

— Смена фазы колебаний PDO с положительной на преимущественно отрицательную, с чем обычно связывается начало процесса накопления положительных аномалий в северной и западной частях Тихого океана (Mantua et al., 1997; Данова, 2011).

— Переход значений индекса WP к отрицательной фазе, который можно связать с уменьшением градиента давления между субтропиками и субполярными широтами, блокированием западного переноса, ослаблением зональной атмосферной циркуляции в средней тропосфере на уровне АТ-500, усилением межширотного обмена и потеплением в Северо-Тихоокеанском секторе и на севере Евразии (Попова, Шмакин, 2010; Попова, 2014; Котляков и др., 2015).

— Уменьшение значений ОКН, свидетельствующее об ослаблении охотского антициклона. При слабовыраженном охотском антициклоне наблюдается усиление циклонической активности над СЗТО, выход циклонов и вынос теплых воздушных масс на акваторию Охотского моря (Шатилина и др., 2016).

Эти процессы происходят синхронно с межгодовыми изменениями температуры воды и воздуха и являются следствием изменения давления в климатических центрах действия атмосферы, их смещения и тесных связей с крупномасштабными колебаниями в системе океан–атмосфера всей северной части Тихого океана (Пономарев и др., 2007; и др.). В течение холодного сезона наблюдается только значимый положительный тренд в ходе NPI, что указывает на ослабление влияния на циркуляционную деятельность алеутской депрессии. Между изменениями климатических индексов и вариациями климатических параметров, характеризующих состояние термического и барического полей, имеются статистически значимые прямые и обратные корреляционные связи (табл. 8). Как было показано выше, благодаря этим воздействиям в приземном слое и на поверхности моря формируется сложная пространственная многомодовая структура распределения амплитуд и дисперсии этих колебаний, а также статистически значимые тренды межгодовых изменений полей температуры воды, воздуха и скорости ветра. Во всех районах корреляционные связи лучше всего выражены в начале теплого сезона (июль) — периода наибольших трендов в межгодовых изменениях климатических параметров (см. табл. 1–3, 8). Так, в поле температуры воздуха в теплый сезон для большинства выделенных районов коэффициенты корреляции разного знака значимы для всех климатических индексов, кроме АО, а в холодный — только для WP. В поле температуры воды в теплый сезон для большинства районов коэффициенты корреляции разного знака значимы для WP, ОКН и SOI, а в холодный — только для PDO. Эти корреляционные связи проявляются в ходе временных коэффициентов различных мод ЭОФ как в теплый, так и в холодный сезоны года.

Заключение

По данным наблюдений на ГМС и реанализа были определены общие тенденции и региональные особенности межгодовых изменений характеристик термического режима прибрежных акваторий западной части Берингова моря и прилегающих районов в 1980–2016 гг. на фоне глобального «потепления» климата.

Климатические изменения термического режима в исследуемом районе проявляются в увеличении температуры воздуха в среднем со скоростью $0,27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, а воды — $0,23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, что объясняет соответственно 27 и 35 % их межгодовой изменчивости. Для поля температуры воздуха эта величина больше глобальных оценок ($0,17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$), но меньше значений, характерных для северной части Японского ($0,32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) и Охотского морей ($0,34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) за тот же период. Для поля температуры воды в районе исследований эта величина несколько выше соответствующих оценок для названных морей ($0,19$ и $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$).

Характер потепления неодинаков в различные сезоны и в отдельных районах. Наиболее быстрый рост температуры воздуха и воды наблюдался в теплый сезон (в среднем $0,36$ и $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). В направлении с юга на север в выделенных районах наблюдается возрастание дисперсии колебаний и трехкратное увеличение скорости роста среднегодовой температуры воды от $0,11$ до $0,32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Величина вклада трендовой составляющей в суммарную дисперсию изменялась в том же направлении от 8 до 38 %, а температура воды за исследуемый период в этих районах возросла от $0,4$ до $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследование особенностей пространственной структуры поля межгодовых колебаний температуры воды и корреляционных связей характеристиками термических условий и атмосферными процессами показало, что в результате атмосферных

воздействий на поверхности моря формируется сложная многомодовая структура распределения амплитуд и дисперсии колебаний температуры. Произошедшие в результате климатического сдвига нарушения барического поля и сезонного режима региональной муссонной циркуляции выражены в изменениях ветрового режима как в холодный, так и в теплый сезоны года. Во временном ходе межгодовых изменений зональной, меридиональной компонент скорости ветра и климатических (циркуляционных) индексов присутствуют статистически значимые трендовые составляющие. В поле температуры воздуха в теплый сезон для большинства выделенных районов коэффициенты корреляции разного знака значимы для всех индексов, кроме АО, а в холодный — только для WP. В поле температуры воды в теплый сезон для большинства районов коэффициенты корреляции разного знака значимы для WP, ОКН и SOI, а в холодный — только для PDO.

Список литературы

- Андреев А.Г., Жабин И.А.** Влияние продолжения Аляскинского течения на динамику вод восточной части Охотского моря // Вестн. ДВО РАН. — 2015. — № 2. — С. 87–92.
- Глебова С.Ю.** Изменения атмосферного режима над Дальневосточным регионом в 2000–2004 гг. и предполагаемые тенденции развития на ближайшие годы // Изв. ТИНРО. — 2005. — Т. 142. — С. 214–222.
- Глебова С.Ю.** Типы атмосферных процессов над дальневосточными морями, межгодовая изменчивость их повторяемости и сопряженность // Изв. ТИНРО. — 2003. — Т. 134. — С. 209–257.
- Глебова С.Ю., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д.** Долгопериодные тенденции в ходе атмосферных процессов и термического режима дальневосточных морей за последний 30-летний период // Изв. ТИНРО. — 2009. — Т. 159. — С. 285–298.
- Данова Т.Е.** Взаимосвязь региональных климатических индексов и динамики морского льда Арктического бассейна // Региональные проблемы. — 2011. — Т. 14, № 1. — С. 42–47.
- Карпова И.П., Шатилина Т.А.** Долгопериодная изменчивость температуры воды и воздуха у юго-западного побережья Сахалина // Изв. ТИНРО. — 2000. — Т. 127. — С. 50–60.
- Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А. и др.** Современные изменения ледников горных районов России : моногр. — М. : Тов-во научных изданий КМК, 2015. — 288 с.
- Пономарев В.И., Каплуненко Д.Д., Дмитриева Е.В. и др.** Климатические изменения в северо-западной части Азиатско-Тихоокеанского региона // Дальневосточные моря России. Кн. 1 : Океанологические исследования. — М. : Наука, 2007. — С. 17–48.
- Попова В.В.** Летнее потепление на европейской территории России и экстремальная жара 2010 г. как проявление тенденций крупномасштабной атмосферной циркуляции в конце XX в. — начале XXI в. // Метеорол. и гидрол. — 2014. — № 3. — С. 37–49.
- Попова В.В., Шмакин А.Б.** Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в северной Евразии во второй половине XX — начале XXI веков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2010. — Т. 46, № 2. — С. 161–175.
- Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А.** Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов Охотского моря за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. — 2017. — Т. 191. — С. 176–195.
- Смирнов Н.П., Воробьев В.Н.** Северо-тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана : моногр. — СПб. : РГТМУ, 2002. — 122 с.
- Устинова Е.И., Глебова С.Ю., Сорокин Ю.Д.** Гидрометеорологические условия дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана в 2008 г. // Вопр. промысл. океанологии. — 2008. — Вып. 5, № 2. — С. 48–67.
- Хен Г.В., Басюк Е.О., Сорокин Ю.Д. и др.** Термические условия на поверхности Берингова и Охотского морей в начале 21-го века на фоне полувековой изменчивости // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 153. — С. 254–263.
- Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В.** Оценка тенденций изменчивости центров действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом в летние периоды 1950–1979 и 1980–2012 гг. // Метеорол. и гидрол. — 2016. — № 1. — С. 17–28.
- Hughes F.W., Coachman L.K., Aagaard K.** Circulation, transport and water exchange in the Bering Sea // Oceanography of the Bering Sea with emphasis on renewable resources. Int. Symp. for Bering Sea study. — Fairbanks, Alaska, 1974. — P. 59–98.
- Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y. et al.** A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // Bull. Am. Meteorol. Soc. — 1997. — Vol. 78, № 6. — P. 1069–1079.

Поступила в редакцию 28.03.18 г.

Принята в печать 12.04.18 г.