

И.Д. РОСТОВ, Е.В. ДМИТРИЕВА, А.А. ВОРОНЦОВ

## Тенденции климатических изменений термических условий моря Лаптевых за последние 37 лет

*По данным срочных наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета за 1981–2017 гг. и реанализа NOAA\_OI\_SST\_V2 изучена межгодовая изменчивость температуры воздуха и воды на поверхности моря Лаптевых на современном этапе потепления климата. С использованием эмпирических ортогональных функций, методов кластерного и корреляционного анализа исследована пространственно-временная структура колебаний температуры. Средние климатические тренды за 10 лет оцениваются для температуры воздуха величиной  $+0,75$  °C, а для температуры воды –  $+0,35$  °C (для летнего сезона). Установлены причинно-следственные связи этих изменений с вариациями составляющих поля ветра и климатическими индексами. Уточнена количественная оценка современных тенденций и региональных особенностей межгодовой изменчивости термических условий в море Лаптевых в сравнении с сопредельными районами восточной Арктики.*

*Ключевые слова:* море Лаптевых, прибрежные воды, прилегающие акватории, термические условия, межгодовая изменчивость, тренды температуры, климатические индексы, корреляционные связи, разложение по ЭОФ, региональные особенности.

**Tendencies of climatic changes for thermal condition of the Laptev Sea in the last 37 years.** I.D. ROSTOV, E.V. DMITRIEVA (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok), A.A. VORONTSOV (All Russian Research Institute of Hydrometeorological Information. World Data Center, Obninsk).

*Air and sea surface temperature (SST) year-to-year variability in recent conditions of climatic warming was studied for the Laptev Sea on the data of regular observations on meteorological stations in 1981–2017 and NOAA\_OI\_SST\_V2 reanalysis data. Space-temporal structure of temperature field was analyzed using the methods of Empirical Orthogonal Functions (EOF), cluster analysis and correlation analysis. Mean climatic trends are estimated for the air temperature as  $+0.75$  °C/decade and for SST as  $+0.35$  °C/decade (for hot season). Cause-and-effect relationships of these changes with variations of the wind field components and climatic indexes are established. Quantitative assessment of current trends and regional features of the year-to-year variability of thermal conditions in the Laptev Sea in comparison with the adjacent areas of the Eastern Arctic are specified.*

*Key words:* the Laptev Sea, nearshore waters, adjacent waters, thermal conditions, year-to-year variability, temperature trends, climate indices, correlation relations, EOF analysis, regional features.

Происходящие на рубеже XX–XXI вв. изменения климата отчетливо проявляются в Арктике, где потепление происходит быстрее, чем в мире в целом. Эти изменения влекут за собой масштабные экологические и экономические последствия и определяются рядом причин, среди которых – астрономические факторы, крупномасштабные планетарные процессы и др. [1, 2, 6, 7, 11, 12]. В последнее время наблюдается ускорение деструктивных процессов в ледяном покрове Арктики, в результате чего море поглощает больше солнечной энергии летом. Осенью часть накопленного тепла возвращается в атмосферу,

\*РОСТОВ Игорь Дмитриевич – кандидат географических наук, заведующий лабораторией, ДМИТРИЕВА Елена Витальевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток), ВОРОНЦОВ Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Мировой центр данных, Обнинск). \*E-mail: rostov@poi.dvo.ru

смягчая климат региона. Наибольший рост температуры вод отмечается в восточном секторе Арктики: 4 % в год период с 1979 по 2005 г. [15, 17]. Высокоширотное положение, большая удаленность от Атлантики и Тихого океана делают море Лаптевых одним из самых суровых [3, 16], что отражается в изменениях характеристик его термического режима в период общего потепления климата.

Цель настоящей работы – уточнить тенденции, количественные характеристики и возможные причинно-следственные связи межгодовых изменений термических условий моря Лаптевых за последние 37 лет и сравнить полученные результаты с оценками по другим морям азиатской части России.

## Материал и методы

Для анализа межгодовых изменений термических условий использовались контролируемые данные измерений температуры воды и воздуха на гидрометеостанциях (ГМС) Росгидромета за период 1981–2017 гг. (<http://meteo.ru>). Выбранные ГМС расположены на материковом побережье и Новосибирских островах в полосе широт 71,5–76° с.ш. (рис. 1), что позволяет получить сопоставимые оценки региональных особенностей межгодовой изменчивости температур. Отобранные ряды охватывали весь указанный период наблюдений и имели минимальное количество пропусков, которые были восстановлены с помощью статистических методов [10].

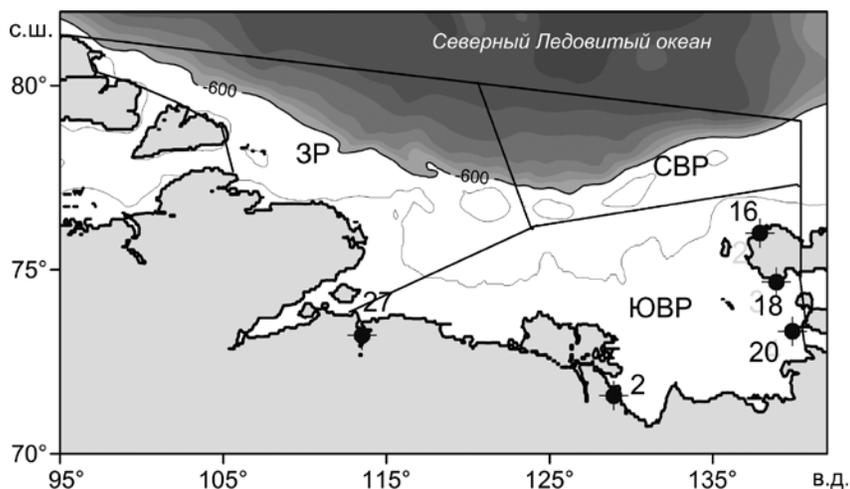


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдений и выделенных районов в море Лаптевых: СВР – северо-восточный, ЗР – западный и ЮВР – юго-восточный. Номера и расположение ГМС см. в табл. 1

По данным срочных наблюдений были рассчитаны средние месячные, сезонные и годовые значения, что обеспечило получение сглаженных, относительно однородных рядов межгодовых изменений приземной температуры воздуха ( $T_a$ ) и температуры воды ( $T_w$ ) за июнь–октябрь. С учетом наличия данных, продолжительности ледового периода и особенностей внутригодового хода  $T_a$  и  $T_w$  были выделены условно теплый (июнь–октябрь) и условно холодный (ноябрь–апрель) сезоны.

В работе использованы данные реанализа поверхностной температуры  $T_{wt}$  (SST) на регулярной сетке и поля ветра по морю Лаптевых и прилегающим районам восточной Арктики, а также климатические (циркуляционные) индексы (КИ): индекс Тихоокеанского декадного колебания (PDO), индекс Южного (SOI) и Арктического колебаний (АО), региональный индекс летнего Охотоморского максимума (ОКН), Западно-Тихоокеанский

(WP) и Северо-Тихоокеанский (NPI) индексы, индексы Северо-Атлантического (NAO) и Атлантического мультидекадного (AMO) колебаний (сайты NOAA – <http://www.cpc.ncep.noaa.gov> и <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/getpage.pl>). В качестве вспомогательной информации были использованы сведения о ледовитости морей Национального ледового центра США (<http://www.natice.noaa.gov/>) и другие данные [4, 6].

Тренды оценивались для временных рядов, включающих среднегодовые значения наблюдаемых параметров и значения 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%-м уровне значимости линейного тренда была принята величина 0,33 (коэффициент детерминации  $R^2 \geq 0,11$ ).

Структура межгодовых изменений  $T_{wg}$  и поля ветра исследовалась с использованием метода разложения множества рядов (полей) на главные компоненты, или эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). С использованием данных реанализа поля температуры воды на поверхности моря по трем главным компонентам ЭОФ методами кластерного анализа [10, 13] были выделены три относительно обособленных по характеру климатических изменений района: расположенные на северо-востоке (СВР), западе (ЗР) и юго-востоке (ЮВР) акватории моря Лаптевых (рис. 1).

## Результаты исследования

*Межгодовая изменчивость температуры воздуха и воды в прибрежно-островной зоне моря Лаптевых.* Общее представление об особенностях межгодовых изменений  $T_a$  в исследуемом районе дают количественные оценки, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воздуха на ГМС Росгидромета в море Лаптевых

Номер ГМС	Расположение ГМС	Зима		Весна		Лето		Осень		Год		
		КЛТ	D	КЛТ	D	КЛТ	D	КЛТ	D	КЛТ	D	$\Sigma T_a$
2	Бухта Тикси	0,08	0,2	<b>0,88</b>	13	<b>0,55</b>	17	<b>0,94</b>	38	<b>0,58</b>	21	2,1
16	Остров Котельный	<b>0,53</b>	15	<b>1,13</b>	41	<b>0,46</b>	18	<b>1,40</b>	42	<b>0,89</b>	46	3,3
18	Пролив Санникова	<b>0,61</b>	18	<b>1,03</b>	36	<b>0,26</b>	12	<b>1,44</b>	41	<b>0,85</b>	45	3,1
20	Мыс Кигилях	0,40	10	<b>0,98</b>	33	<b>0,39</b>	14	<b>1,38</b>	46	<b>0,80</b>	42	3,0
27	Анабар	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>0,61</b>	29	2,3
	Все ГМС	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>0,75</b>	41	2,8

Примечание. КЛТ – коэффициент наклона линейного тренда, °С за 10 лет; D – вклад тренда в суммарную дисперсию, %;  $\Sigma T_a$  – тренд за 1981–2017 гг., °С. Здесь и далее в таблицах полужирным шрифтом выделены значимые оценки тренда. Прочерк – отсутствие сопоставимых данных.

На всех станциях тренды межгодовых изменений среднегодовых значений  $T_a$  положительны во все сезоны. Среднегодовые величины КЛТ изменялись от 0,58 на юге до 0,89 °С за 10 лет на севере района, что свидетельствует о повсеместном возрастании температуры воздуха за последние 37 лет на величину от 2,1 до 3,3 °С (в среднем на 2,8 °С). В межгодовом ходе наибольшие величины трендов (1,48–1,97 °С за 10 лет) наблюдались в ноябре, с началом наступления полярной ночи, когда теплоотдача с поверхности моря резко возрастает [17]. По всем ГМС величина статистически значимого линейного тренда изменений  $T_a$  как среднегодовой, так и за теплый период составила 0,75 °С за 10 лет, а вклад тренда в суммарную дисперсию (D) был равен 41 %. В прибрежной зоне сопредельных Восточно-Сибирского и Чукотского морей величина тренда несколько выше – около 1,0 °С за 10 лет, а в дальневосточных морях значительно ниже: в Беринговом – 0,27, Охотском – 0,34, северной части Японского – 0,32 °С за 10 лет [9, 10].

Межгодовые изменения  $T_a$  характеризуются тесными корреляционными связями ( $R = 0,73-0,99$ ). На рис. 2а, б приведены обобщенные кривые временного хода среднегодовых величин аномалий и накопленных аномалий  $T_a$  на прибрежных ГМС.

Изменения среднегодовых величин отражают чередование теплых и холодных лет, а накопленных аномалий – низкочастотные составляющие и отдельные периоды в межгодовом ходе температуры, которые хорошо согласуются с изменениями ледовитости ( $R = 0,64$ ). В первую половину периода наблюдений преобладали отрицательные аномалии  $T_a$  и положительные – ледовитости. В это время в сентябре от 50 до 90 % площади поверхности моря было покрыто ледяными полями различной сплоченности [4, 6]. В результате планетарных изменений на рубеже XX–XXI вв. и произошедшего сдвига климатического режима [1, 7] в дальневосточных [9, 10] и арктических морях после 2000 г. наблюдается фаза устойчивого накопления положительных аномалий  $T_a$  и отрицательных – ледовитости (рис. 2б).

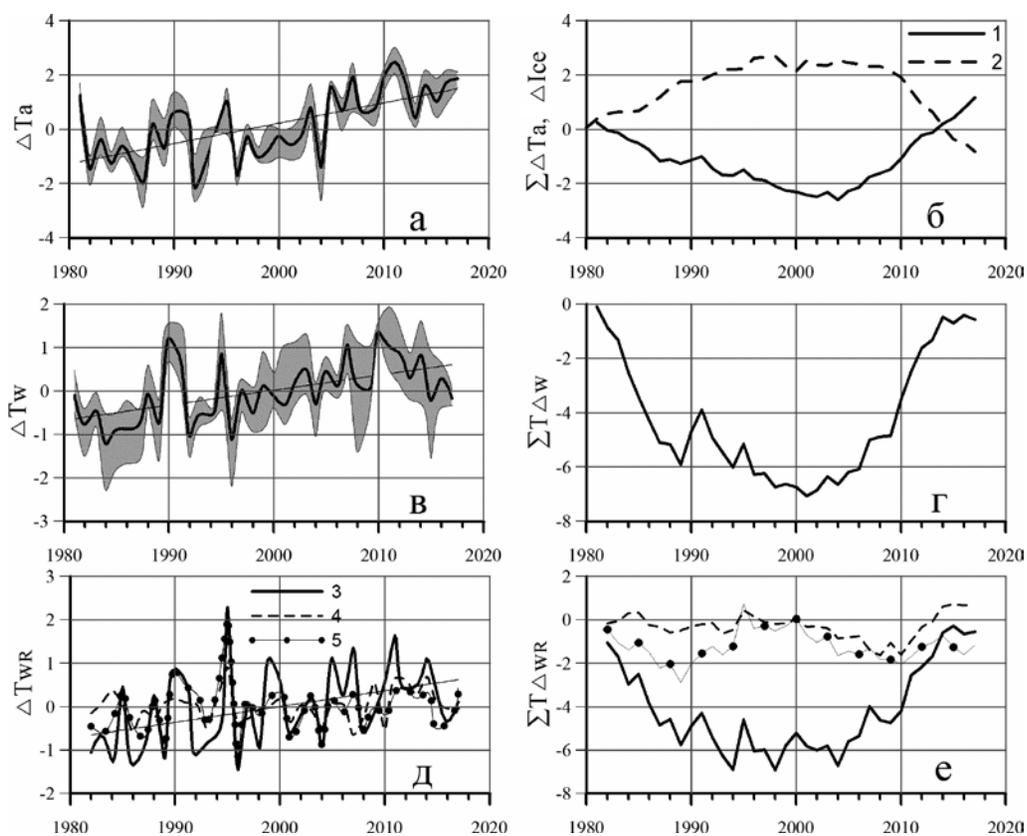


Рис. 2. Межгодовая изменчивость аномалий (а, в, д) и накопленных аномалий (б, г, е) температуры воздуха (1 –  $\Delta T_a$ , среднегодовые) и ледовитости (2 –  $\Delta Ice$ , сентябрь, нормализованные значения) в море Лаптевых (а, б), температуры воды ( $\Delta T_w$ ) в теплый период на ГМС (в, г) и в выделенных районах (д, е): 3 – СВР, 4 – ЗР, 5 – ЮВР. Показаны диапазоны колебаний и линии тренда

Рассмотрим особенности межгодовой изменчивости температуры воды на ГМС и в выделенных районах моря Лаптевых. Оценки изменений  $T_w$  ( $T_{wr}$ ) межгодовых и в теплый период года приведены в табл. 2.

На всех станциях отмечаются статистически значимые положительные тренды, с которыми связано возрастание  $T_w$  в прибрежной зоне за исследуемый период на величину от 0,8 до 1,5 °C (в среднем на 1,2 °C). В центрах кластеров выделенных морских районов величины тренда несколько меньше, а максимальное значение (0,36 °C за 10 лет) наблюдалось в СВР. В других районах положительные тренды незначимы. В среднем для

Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воды на ГМС и в выделенных районах в теплый период года за 1981–2017 гг.

Номер ГМС	Расположение ГМС	$\sigma^2$	D	$\Sigma Tw$	КЛТ	КЛТм
2	Бухта Тикси	0,91	12	1,1	<b>0,30</b>	<b>0,65</b> (7)
16	Остров Котельный	0,63	32	1,5	<b>0,41</b>	<b>0,82</b> (8, 9)
18	Пролив Санникова	0,38	18	0,9	<b>0,25</b>	<b>0,62</b> (9)
20	Мыс Кигилях	0,52	12	0,8	<b>0,22</b>	<b>0,57</b> (9)
27	Анабар	–	–	–	<b>0,25</b>	<b>0,69</b> (7)
	Все ГМС	0,49	29	1,2	<b>0,35</b>	<b>0,82</b> (9)
	Районы:					
	СВР	0,88	16	1,3	<b>0,36</b>	<b>0,66</b> (8)
	ЗР	0,13	3	0,2	0,06	<b>0,14</b> (10)
	ЮВР	0,34	1	0,2	0,06	<b>-0,36</b> (9)
	Море Лаптевых	0,18	11	0,6	<b>0,15</b>	<b>0,19</b> (8)

Примечание.  $\sigma^2$  – дисперсия; КЛТм – максимальная величина КЛТ (в скобках – месяц); остальные обозначения см. в табл. 1.

акватории моря КЛТ = 0,15 °С за 10 лет при высокой корреляции изменений  $T_w$  с колебаниями ледовитости ( $R = 0,7$ ). Максимальные положительные тренды как на ГМС (до 0,82 °С/10 лет), так и в выделенных районах (до 0,66 °С/10 лет) наблюдались в августе–сентябре. При осреднении данных по всем ГМС оценка статистически значимого КЛТ изменений  $T_w$  в теплый сезон составила 0,35 °С за 10 лет. По нашим данным [9, 10], в прибрежной зоне других морей восточной Арктики эта величина примерно в 2 раза выше, а в дальневосточных морях – ниже: в Беринговом – 0,16, Охотском – 0,34 °С за 10 лет. Данные по температуре воды 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. Однако связь колебаний  $T_w$  между отдельными ГМС и  $T_w$  в центрах кластеров двух выделенных районов (СВР и ЮВР), как правило, высока ( $R = 0,5–0,8$ ). Межгодовые флуктуации  $T_w$  и  $T_a$  на всех ГМС также характеризуются сильными корреляционными связями ( $R = 0,8$ ). На кривых накопленных аномалий  $T_w$  и  $T_a$  на ГМС (рис. 2б, з) выделяются точки перегиба, соответствующие двум фазам чередования относительно холодных и теплых периодов на фоне общего потепления. На рис. 2д, е хорошо заметны различия в интенсивности (размах колебаний) и характере протекания (синхронность колебаний) этого процесса, а также несинхронность времени наступления второй фазы в выделенных районах.

Исходя из соотношения среднегодовых аномалий  $T_w$  и их стандартных отклонений [5] были выделены годы, соответствующие пяти тепловым режимам вод. Результаты расчетов приведены в виде диаграммы для станций и выделенных районов (рис. 3).

Как видно из рис. 2 и 3, периоды потепления и похолодания перемежаются во времени и охватывают одновременно обширные участки акваторий. В многолетнем ходе  $T_w$  на фоне чередования «холодных» и «теплых» лет выражена общая тенденция потепления вод. По данным ГМС и реанализа, аномально холодными были 1984–1986, 1992, 1996 и 2015 гг., а аномально теплыми – 1990, 1991, 1995, 2007, 2010–2012 и 2014 гг. Для 2015 г. аномально холодное состояние вод фиксировалось только в бухте Тикси.

*Анализ пространственной структуры межгодовых изменений температуры воды.* В начале рассматриваемого периода на большей части акватории моря наблюдались только отрицательные аномалии среднегодовых величин  $T_w$ . В процессе потепления знак аномалий сменился на противоположный, а область с отрицательными аномалиями локализовалась на юго-востоке моря Лаптевых. При этом граница распространения льда,

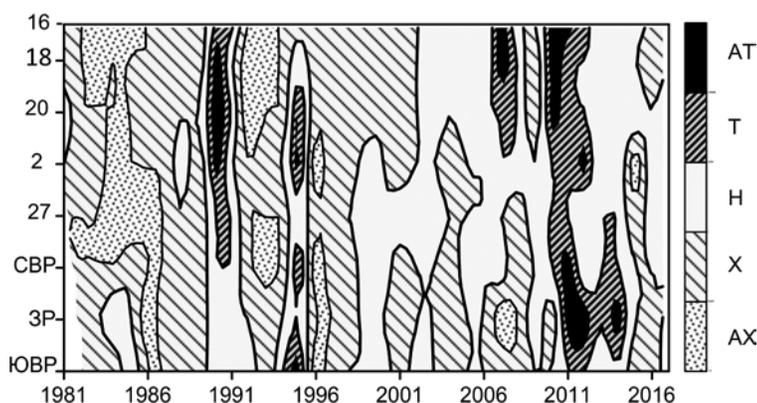


Рис. 3. Чередование периодов anomalно теплых (АТ), теплых (Т), нормальных (Н), холодных (Х) и anomalно холодных (АХ) лет на ГМС в прибрежной зоне и в выделенных районах моря Лаптевых. На левой вертикальной оси приведены номера станций и обозначения районов

наблюдавшаяся в сентябре 1980 г. (рис. 4а), в сентябре 2017 г. сместилась к северу почти за пределы акватории моря.

В многолетнем ходе  $T_{wg}$  на большей части моря, исключая акваторию ЮВР, наблюдались только положительные тренды, в отдельные месяцы отрицательные тренды полностью отсутствовали (рис. 4б). Отмеченные особенности пространственно-временной изменчивости поля температуры формируются в результате взаимодействия разномасштабных процессов, происходящих в море и атмосфере. Первые три моды ЭОФ аккумулируют 85 % дисперсии межгодовых колебаний  $T_{wg}$  и дают наиболее полное представление об особенностях структуры межгодовой изменчивости этого поля (рис. 5). В рядах временных изменений коэффициентов разложения выделялись статистически значимые положительные тренды только для первой и второй мод (рис. 5б, г).

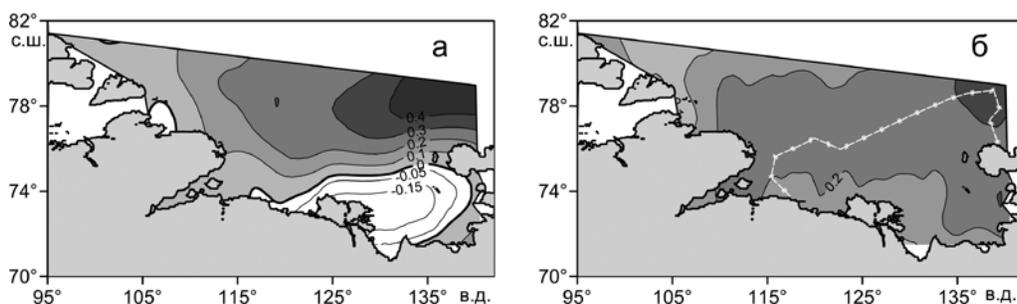


Рис. 4. Коэффициенты линейного тренда температуры воды ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) в 1982–2017 гг. за весь теплый период (а) и в октябре (б). Штриховой линией отмечена граница распространения льда в сентябре 1980 г.

Межгодовые вариации  $T_w$  на ГМС и  $T_{wg}$  в выделенных районах значимо коррелируют главным образом с колебаниями временных коэффициентов именно первой и второй мод ЭОФ (табл. 3), а изменения  $T_a$  и ледовитости – только с первой модой.

Первая мода (С1) описывает 61 % общей дисперсии вариаций среднегодовых значений  $\Delta T_{wg}$  и отражает вклад наиболее значительных колебаний температуры (рис. 2, 3) в ходе общего потепления в регионе. В поле пространственного распределения коэффициентов этой моды ЭОФ наблюдаются только положительные значения, что свидетельствует о синхронности колебаний температуры в пределах всего бассейна (рис. 5а). Поле пространственного распределения коэффициентов второй (С2) и третьей (С3) мод ЭОФ представлено как положительными, так и отрицательными значениями, что объясняется

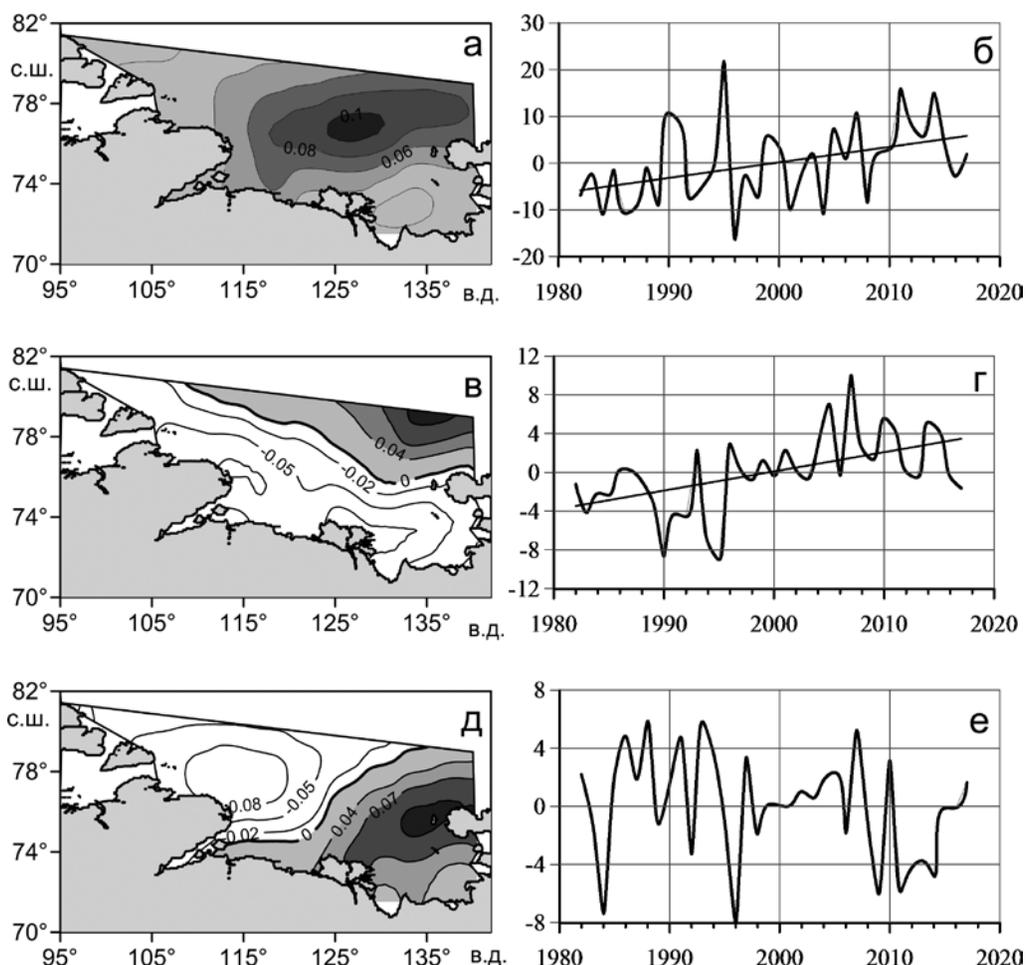


Рис. 5. Пространственное и временное распределение коэффициентов первой (а, б), второй (в, з) и третьей (д, е) мод ЭОФ аномалий температуры воды в море Лаптевых. Показаны линии значимого тренда

несинхронностью колебаний температуры в различных районах. В пространственном распределении коэффициентов второй моды (13 % общей дисперсии) выделяются две области противофазных колебаний – на северо-востоке и юго-западе акватории моря Лаптевых. Первая из них включает шельф, вторая – глубоководную часть моря. Положение этих областей, вероятно, связано с различиями в гидрологических условиях и скоростях процессов прогрева и охлаждения воды рассматриваемых районов. Третья мода (11 % дисперсии) характеризует противофазные колебания в поле температуры небольшой амплитуды в направлении с северо-запада на юго-восток и может быть связана

Таблица 3  
Коэффициенты корреляции межгодовых колебаний температуры воды на ГМС и в выделенных районах с временными коэффициентами первых мод ЭОФ в теплый период

Расположение ГМС, районы	Моды ЭОФ		
	C1	C2	C3
Бухта Тикси	<b>0,74</b>	0,01	0,14
Остров Котельный	<b>0,69</b>	<b>0,42</b>	-0,01
Пролив Санникова	<b>0,64</b>	0,22	0,13
Мыс Кигилях	<b>0,67</b>	0,13	0,25
Анабар	<b>0,67</b>	0,13	-0,03
Районы:			
СВР	<b>0,95</b>	<b>0,51</b>	0,06
ЗР	<b>0,58</b>	<b>-0,37</b>	<b>-0,61</b>
ЮВР	<b>0,81</b>	<b>-0,39</b>	0,08
Море Лаптевых	<b>0,99</b>	-0,06	-0,04

с различиями в гидрологических условиях, находящихся под влиянием атлантических вод и стока рек с материкового побережья [3], а также с локальными особенностями поля ветра.

*Корреляционные связи между характеристиками термических условий и атмосферными процессами.* В условиях глобального потепления основными причинами формирования областей положительных аномалий  $T_w$  и  $T_a$  являются изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции, расположения и выраженности центров действия атмосферы, интенсивности и соотношения зональных и меридиональных переносов в атмосфере. Эти изменения отражаются в отдельных циркуляционных показателях, в частности в колебаниях климатических индексов. Между изменениями КИ и вариациями климатических параметров, характеризующих состояние термического и барического полей, имеются статистически значимые прямые и обратные корреляционные связи [10]. Был проведен взаимный корреляционный анализ временных рядов температуры воды и воздуха, коэффициентов мод ЭОФ разложения полей аномалий  $\Delta T_w$  и ветра с индексами, характеризующими состояние и динамику климатической системы. В рассматриваемый период в ходе межгодовых изменений КИ присутствовали статистически значимые положительные и отрицательные трендовые составляющие (табл. 4), отражающие тенденции в изменениях крупномасштабной атмосферной циркуляции [1, 6, 8, 10].

Таблица 4

**Коэффициенты корреляции межгодовых изменений климатических индексов с колебаниями аномалий  $T_a$  на ГМС в теплый (над чертой) и холодный (под чертой) сезоны**

Показатель, расположение ГМС	PDO	NPI	WP	SOI	AO	OKH	NAO	AMO
КЛТ (июль)	<b>-0,4</b>	–	<b>-0,3</b>	0,1	-0,01	<b>-0,4</b>	-0,2	<b>0,2</b>
Бухта Тикси	<u>-0,18</u> 0,06	– 0,16	<u>-0,43</u> <b>-0,46</b>	<u>0,17</u> 0,15	<u>-0,17</u> <b>0,47</b>	<u>-0,18</u> –	<b>-0,33</b> 0,15	<b>0,51</b> 0,17
Остров Котельный	<u>-0,27</u> -0,09	– 0,19	<u>-0,39</u> <b>0,35</b>	<u>0,01</u> 0,29	<u>-0,26</u> 0,05	<b>-0,42</b> –	<u>-0,30</u> -0,13	<b>0,49</b> <b>0,50</b>
Пролив Санникова	<u>-0,28</u> -0,20	– 0,25	<u>-0,33</u> -0,27	<u>0,10</u> <b>0,33</b>	<u>-0,23</u> 0,07	<b>-0,47</b> –	<u>-0,30</u> -0,15	<b>0,53</b> <b>0,53</b>
Мыс Кигилях	<u>-0,25</u> -0,16	– 0,24	<u>-0,36</u> -0,31	<u>0,10</u> <b>0,36</b>	<u>-0,18</u> 0,09	<b>-0,39</b> –	<u>-0,31</u> -0,12	<b>0,54</b> <b>0,48</b>
Анабар	<u>-0,38</u> 0,05	– -0,01	<u>-0,39</u> -0,19	<u>0,09</u> 0,25	<b>-0,34</b> 0,11	<u>-0,30</u> –	<b>-0,38</b> 0,05	<b>0,61</b> <b>0,33</b>
Все ГМС	<u>-0,30</u> -0,07	– 0,18	<u>-0,40</u> <b>-0,36</b>	<u>0,11</u> 0,29	<u>0,27</u> 0,20	<b>-0,37</b> –	<b>-0,35</b> -0,04	<b>0,57</b> <b>0,37</b>

Примечание. КЛТ – коэффициент линейного тренда КИ, отн. ед./10 лет. Прочерк – отсутствие оценок из-за сезонности центров действия атмосферы.

В теплый сезон, когда наблюдались статистически значимые положительные тренды межгодовых вариаций  $T_w$  и  $T_a$ , в ходе рассматриваемых КИ произошли следующие изменения:

- фазы колебаний PDO изменились с положительной на преимущественно отрицательную, с чем обычно связывается начало процесса накопления положительных аномалий температуры в северной, западной частях Тихого океана и восточной Арктике;

- значения индекса WP перешли к отрицательной фазе, что можно связать с уменьшением градиента давления между субтропиками и субполярными широтами, блокированием западного переноса и ослаблением зональной атмосферной циркуляции в средней тропосфере на уровне АТ-500, усилением межширотного обмена и потеплением в Северо-Тихоокеанском секторе и северной Евразии [1, 8]. При этом усилился перенос циклонами в Арктику более теплого воздуха из средних широт северной части Тихого и Атлантического океанов;

- значения ОКН снизились, что означает ослабление Охотского антициклона. При слабовыраженном Охотском антициклоне наблюдаются усиление циклонической активности

над северо-западом Тихого океана, выход циклонов и вынос теплых воздушных масс на акваторию Охотского, Берингова морей и в восточную Арктику;

– АМО с середины 1990-х годов находится в положительной фазе, свидетельствующей о потеплении в Атлантике и Северном полушарии. Эта фаза может длиться 20–40 лет [14].

В холодный сезон значимый положительный тренд фиксируется только в ходе индексов NPI и АМО, что указывает на ослабление влияния на циркуляционную деятельность Алеутской депрессии и продолжающееся потепление в Северном полушарии. В теплый сезон проявляются статистически значимые прямые и обратные корреляционные связи увеличения  $T_a$  с процессами, параметризуемыми индексами WP, ОКН, NAO и АМО, в холодный – с изменениями АМО, а на отдельных ГМС – с WP, SOI и АО. Изменения  $T_w$  в прибрежной зоне и на севере акватории моря Лаптевых в основном согласуются с вариациями индексов ОКН и АМО (табл. 5). Атмосферные процессы, связанные с АО и АМО, оказывают влияние на формирование первой и второй мод ЭОФ. Влияние других КИ совсем не проявляется или значительно ослаблено.

Таблица 5

**Коэффициенты корреляции межгодовых изменений климатических индексов с колебаниями аномалий температуры воды на ГМС в выделенных районах и коэффициентами первых мод ЭОФ поля  $\Delta T_w$  в теплый сезон**

Расположение ГМС, районы, моды ЭОФ	PDO	WP	SOI	АО	ОКН	NAO	АМО
Бухта Тикси	-0,32	-0,22	0,30	-0,09	<b>-0,33</b>	-0,24	<b>0,43</b>
Остров Котельный	-0,31	-0,29	0,15	-0,23	<b>-0,36</b>	-0,19	<b>0,44</b>
Пролив Санникова	<b>-0,40</b>	-0,12	0,26	-0,12	<b>-0,47</b>	-0,29	<b>0,47</b>
Мыс Кигилях	-0,12	-0,32	0,16	-0,13	<b>-0,33</b>	-0,17	<b>0,46</b>
Анабар	-0,30	-0,32	0,18	-0,32	-0,20	-0,23	<b>0,54</b>
Все ГМС	<b>-0,35</b>	-0,32	0,25	-0,22	<b>-0,38</b>	-0,27	<b>0,56</b>
Районы:							
СВР	-0,25	-0,19	0,20	-0,18	<b>-0,37</b>	-0,15	<b>0,40</b>
ЗР	-0,12	-0,08	-0,05	-0,11	-0,08	0,12	0,11
ЮВР	-0,13	-0,06	0,07	-0,06	-0,20	0,0	0,10
Море Лаптевых	-0,16	-0,16	0,05	-0,17	-0,28	-0,11	0,31
Моды ЭОФ:							
С1	-0,19	-0,19	0,09	-0,19	-0,31	-0,14	<b>0,35</b>
С2	-0,16	-0,15	0,17	<b>-0,35</b>	-0,24	-0,31	<b>0,38</b>
С3	0,23	0,06	-0,16	0,16	0,12	-0,16	-0,14

Поле приводного ветра в исследуемом районе сильно неоднородно, неустойчиво и характеризуется значительной завихренностью. Анализ межгодовых вариаций величин меридиональной и зональной компонент скорости ветра, осредненных по всей акватории моря, указывает на отсутствие статистически значимых трендов во все месяцы и сезоны года, за исключением ноября, когда наблюдается возрастание скорости западных румбов. Из-за неоднородности структуры поля ветра и сложного характера процессов взаимодействия в системе море–атмосфера коэффициенты корреляции межгодовых колебаний  $T_w$  и  $T_a$  в теплый период с меридиональной ( $V$ ) и зональной ( $U$ ) компонентами поля ветра статистически не значимы, что отличает арктические моря от дальневосточных, где четко выражена муссонная циркуляция [9, 10]. В холодный период возрастание скорости ветра западных румбов сопровождается увеличением  $T_a$  на ГМС и уменьшением ледовитости моря, а восточных – наоборот, снижением  $T_a$  и повышением ледовитости моря ( $R = 0,4-0,7$ ).

Первые две моды ЭОФ вариаций компонент  $V$  и  $U$  поля скорости ветра характеризуют пространственное положение основных энергоактивных зон в пределах акватории моря Лаптевых. Корреляционные связи межгодовых изменений коэффициентов мод ЭОФ поля ветра,  $T_w$  и  $T_a$  и климатических индексов сложны и неоднозначны для интерпретации.

Отметим, что межгодовые изменения  $T_a$  в холодный период связаны с вариациями временных коэффициентов как первой, так и второй мод ЭОФ обеих компонент скорости ветра, а изменения ледовитости – только второй моды. В теплый период колебания  $T_a$  и  $T_w$  связаны главным образом со второй модой ЭОФ зональной компоненты разложения поля ветра, причем знак соответствующих коэффициентов корреляции в это время меняется на противоположный (табл. 6).

Таблица 6

**Коэффициенты корреляции межгодовых колебаний температуры воды и воздуха на ГМС с вариациями меридиональной  $V$  и зональной  $U$  (в скобках) компонент скорости ветра и коэффициентов первых мод ЭОФ поля ветра в теплый и холодный периоды года**

Показатель	Бухта Тикси	Остров Котельный	Пролив Санникова	Мыс Кигилях	Анабар
$T_w/V$ (U) tepl.	0,25 (-0,07)	0,11 (-0,22)	0,01 (-0,24)	0,19 (-0,11)	0,22 (-0,14)
$T_a/V$ (U) tepl.	0,32 (-0,04)	0,26 (-0,24)	0,17 (-0,20)	0,22 (-0,12)	0,21 (-0,08)
$T_a/V$ (U) хол.	<b>0,61 (0,68)</b>	0,11 ( <b>0,39</b> )	0,06 ( <b>0,45</b> )	0,03 ( <b>0,44</b> )	0,19 ( <b>0,47</b> )
$T_w/C1-V$ (U) tepl.	0,29 (-0,14)	0,15 (-0,26)	-0,01 (-0,26)	0,16 (-0,15)	0,27 (-0,19)
$T_a/C1-V$ (U) tepl.	<b>0,35</b> (-0,09)	0,31 (-0,28)	0,22 (-0,26)	0,26 (-0,18)	0,21 (-0,14)
$T_a/C1-V$ (U) хол.	<b>0,53 (0,60)</b>	-0,01 ( <b>0,37</b> )	-0,09 ( <b>0,44</b> )	-0,10 ( <b>0,41</b> )	0,05 ( <b>0,58</b> )
$T_w/C2-V$ (U) tepl.	0,01 ( <b>-0,42</b> )	<b>0,41</b> (-0,42)	0,22 (-0,24)	0,13 (-0,37)	0,13 (-0,51)
$T_a/C2-V$ (U) tepl.	-0,06 ( <b>-0,48</b> )	0,02 ( <b>-0,52</b> )	-0,02 ( <b>-0,52</b> )	-0,03 ( <b>-0,55</b> )	-0,06 ( <b>-0,54</b> )
$T_a/C2-V$ (U) хол.	0,14 (0,23)	<b>0,39</b> (-0,26)	<b>0,44</b> (-0,35)	<b>0,42</b> (-0,30)	<b>0,40</b> (-0,12)

Из табл. 7 видно, что статистически значимыми являются корреляционные связи между вариациями зональной компоненты скорости и коэффициентов первой моды ЭОФ ее разложений с индексами АО и ОКН.

Таблица 7

**Коэффициенты корреляции межгодовых изменений КИ с вариациями  $V$  (над чертой) и  $U$  (под чертой) компонент поля ветра и мод ЭОФ этих компонент в теплый период**

Показатель	PDO	WP	SOI	АО	ОКН	NAO	АМО
$V/U$ , tepl.	<u>0,07</u>	<u>-0,18</u>	<u>-0,16</u>	<u>0,13</u>	<u>0,06</u>	<u>-0,25</u>	<u>-0,04</u>
	0,12	-0,05	-0,05	<b>0,36</b>	<b>0,34</b>	0,16	0,0
$C1-V/U$	<u>0,08</u>	<u>-0,16</u>	<u>-0,13</u>	<u>0,03</u>	<u>-0,08</u>	<u>-0,24</u>	<u>-0,03</u>
	0,09	0,03	-0,04	<b>0,40</b>	<b>0,34</b>	0,20	-0,03
$C2-V/U$	<u>-0,08</u>	<u>-0,13</u>	<u>-0,06</u>	<u>0,28</u>	<u>0,12</u>	<u>0,26</u>	<u>-0,12</u>
	-0,06	0,14	0,06	0,31	0,25	<b>0,38</b>	<b>-0,50</b>
$C3-V/U$	<u>-0,14</u>	<u>0,16</u>	<u>0,03</u>	<u>-0,06</u>	<u>-0,36</u>	<u>0,32</u>	<u>0,17</u>
	0,01	-0,07	0,01	-0,30	-0,04	<b>-0,33</b>	0,08

В целом временные колебания коэффициентов отдельных мод ЭОФ компонент поля ветра коррелируют со всеми КИ, кроме PDO, WP и SOI.

## Заключение

Климатические изменения в последние четыре десятилетия в исследуемых районах прибрежной зоны моря Лаптевых проявляются в трендах устойчивого увеличения  $T_a$  со скоростью  $0,75\text{ }^\circ\text{C}$  за 10 лет как в среднегодовом ходе, так и в теплый период и повышения  $T_w$  на  $0,35\text{ }^\circ\text{C}$  за 10 лет (по данным за теплый сезон). Для поля  $T_a$  эта величина несколько меньше значений, характерных для сопредельных морей восточной Арктики (Восточно-Сибирское море –  $1,01$ , Чукотское –  $0,78\text{ }^\circ\text{C}$  за 10 лет), но примерно в 2 раза больше, чем для дальневосточных морей. Для поля  $T_w$  рост показателя меньше, чем в Восточно-Сибирском ( $0,69\text{ }^\circ\text{C}$  за 10 лет) и Чукотском ( $0,58\text{ }^\circ\text{C}$  за 10 лет) морях, но выше соответствующих оценок для Охотского ( $0,34\text{ }^\circ\text{C}$  за 10 лет) и Берингова ( $0,16\text{ }^\circ\text{C}$  за 10 лет)

морей. На фоне отмеченных тенденций с начала 1980-х годов  $T_a$  в исследуемом районе увеличилась на 2,1–3,3 °C,  $T_w$  – на 0,8–1,5 °C, площадь ледяного покрова за последние десятилетия сократилась в 3 раза по сравнению с 1980-ми годами, а зона распространения льда в сентябре 2017 г. сместилась на север к самой границе акватории моря.

Характер потепления различается в отдельных районах и в различные месяцы. В морских акваториях скорость роста  $T_w$  в теплый период года меньше (в среднем 0,15 °C/10 лет), чем в прибрежной зоне. В межгодовом ходе наибольшие величины трендов температуры воды (до 0,8 °C/10 лет) наблюдались в период с июля по сентябрь, а воздуха (до 2,0 °C/10 лет) – в ноябре.

В ходе межгодовых изменений климатических индексов присутствовали статистически значимые положительные и отрицательные трендовые составляющие, которые указывают на произошедшую в конце 1990 – начале 2000-х годов смену режима и изменение крупномасштабной атмосферной циркуляции. В теплый сезон проявляются статистически значимые корреляционные связи увеличения температуры воздуха с процессами, параметризуемыми индексами WP, ОКН, NAO и АМО, а в холодный – главным образом с изменениями АМО. Наблюдаемые изменения температуры воды в основном согласуются с вариациями индексов ОКН и АМО. В вариациях отдельных мод ЭОФ поля ветра прослеживаются корреляционные связи со всеми рассмотренными КИ, кроме SOI.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Пробл. Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 33–41.
2. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. О характере и причинах изменений климата Земли // Пробл. Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 15–23.
3. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
4. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.: Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
5. 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.
6. Плотников В.В., Пустошнова В.И. Изменчивость и сопряженность ледовых условий в системе морей Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) // Метеорол. и гидрология. 2012. № 7. С. 54–65.
7. Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П., Карнаухов А.А. Изменение планетарного климатического режима на рубеже 20–21 веков // Вестн. МГТУ. 2018. Т. 21, № 1. С. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169.
8. 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 гидрология. 2014. № 3. С. 37–49.
9. 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 // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 193. С. 167–182.
10. 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.
11. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // Пробл. Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 52–61.
12. Цатуров Ю.С., Клепиков А.В. Современное изменение климата Арктики: результаты нового оценочного доклада Арктического совета // Арктика: экология и экономика. 2012. № 4 (8). С. 76–81.
13. Ding C., He X. K-means clustering via principal component analysis // Proc. 21st Intern. Conf. on machine learning. Banff, Canada: ACM Press, 2004. P. 225–232. DOI: 10.1145/1015330.1015408.
14. 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. // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28, N 10. P. 2077–2080.
15. 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.
16. 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. Vol. 32. L10614. DOI: 10.1029/2005GL022490.
17. Steele M., Ermold W., Zhang J. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. L02614. DOI: 10.1029/2007GL031651.