

## Климатические изменения термических условий в тихоокеанской субарктике в условиях современного глобального потепления

И. Д. Ростов <sup>✉</sup>, Е. В. Дмитриева, Н. И. Рудых

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Владивосток, Россия*  
<sup>✉</sup> *rostov@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 05.06.2020 г., после доработки – 10.11.2020 г.

**Цель.** Выявить региональные особенности межгодовой изменчивости приземной температуры воздуха в прибрежной зоне и над акваторией Тихого океана (к северу от 40° с. ш.), проявляющиеся в результате глобальных климатических изменений на рубеже XX–XXI вв., оценить их тенденции и возможные причинно-следственные связи с процессами в атмосфере и на поверхности океана – цель данной работы.

**Методы и результаты.** По данным глобальной метеорологической сети и реанализа NOAA определены региональные особенности межгодовых колебаний температуры воздуха и их связи с вариациями полей давления, ветра, температуры воды на поверхности океана и климатических индексов за последние четыре десятилетия. Для определения пространственно-временной структуры поля температуры и районирования акватории по особенностям климатических изменений использованы методы кластерного, корреляционного анализа и аппарата эмпирических ортогональных функций. Полученные результаты позволили охарактеризовать степень неоднородности реакции приводного слоя на происходящие глобальные изменения, выделить обособленные районы и дать количественную оценку скорости потепления в этих акваториях.

**Выводы.** Тенденции современного потепления выражены в трендах межгодовой изменчивости температуры воздуха в субарктике в среднем на величину ~0,20°C/10 лет и указывают на существенные региональные различия (в 1,5–2 раза) происходящих изменений. На западе региона скорость потепления выше, чем на востоке, где температурные тренды минимальны или статистически не значимы. В теплый период года их величина больше, чем в холодный. Фазы чередования теплых и холодных периодов согласуются с тенденциями изменений характеристик центров действия атмосферы и различных климатических параметров. Наиболее масштабно соответствующие корреляционные связи проявляются с вариациями мод эмпирических ортогональных функций поля геопотенциала  $H_{500}$ , индексов  $PDO$ ,  $NP$ ,  $SOI$ ,  $PTW$ ,  $AD$  и  $EP/NP$ . Аномалии и тренды температуры поверхности океана в Северной Атлантике также играют важную роль в формировании аномалий  $T_a$  на западе субарктики.

**Ключевые слова:** Тихий океан, субарктика, прибрежная зона, современные климатические изменения, региональные особенности, температура воздуха, тренды потепления, климатические параметры, корреляционные связи

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН по теме 0271-2019-0003, № государственной регистрации АААА-А17-117030110042-2. Авторы благодарят разработчиков за возможность использовать климатические данные, размещенные на сайтах NOAA, а также рецензента за высказанные конструктивные замечания.

**Для цитирования:** Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И. Климатические изменения термических условий в тихоокеанской субарктике в условиях современного глобального потепления // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С.162–178. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-162-178

# Climatic Changes of Thermal Conditions in the Pacific Subarctic at the Modern Stage of Global Warming

I. D. Rostov , E. V. Dmitrieva, N. I. Rudykh

*V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Vladivostok, Russia*  
 *rostov@poi.dvo.ru*

**Purpose.** The study is aimed at identifying the regional features of the surface air temperature in the coastal zone and over the Pacific Ocean (to the north of 40° N) manifested as a result of global climate changes at the turn of the XX–XXI centuries, and at assessing their trends and possible causal relationships with the processes in the atmosphere and on the ocean surface.

**Methods and Results.** Based on the Global Meteorological Network and NOAA reanalysis data, the regional features of interannual fluctuations of the surface air temperature and their relationship with variations in the fields of pressure, wind and water temperature on the ocean surface, and with climate indices over the past 4 decades were identified. In order to determine the temperature field spatial-temporal structure and to zone the water area according to the features of climate changes, the methods of cluster, correlation analysis and the apparatus of empirical orthogonal functions were used. The results obtained made it possible to characterize the degree of heterogeneity of the studied area response to the ongoing global changes, to identify different domains and to assess quantitatively the warming rate in these water areas.

**Conclusions.** The tendencies of modern warming are manifested in the trends of interannual air temperature variability, on the average, by  $\sim 0.20^{\circ}\text{C}/10$  years in the subarctic, and indicate significant regional differences (1.5–2 times) in the ongoing changes. In the west of the region, the warming rate is higher than in the east, where the temperature trends are minimal or statistically insignificant. In the warm period of a year, their values are higher than those in the cold period. The alternation phases of the warm and cold periods are consistent with the variation tendencies in the characteristics both of the atmospheric action centers and various climatic parameters. The corresponding correlations are most widely manifested in variations in the empirical orthogonal functions modes of the  $H_{500}$  geopotential field, and the PDO, NP, SOI, PTW, AD and EP/NP indices. Stable anomalies and trends of the ocean surface temperature in the North Atlantic also play an important role in formation of the  $T_a$  anomalies in the western subarctic.

**Keywords:** Pacific Ocean, subarctic, coastal zone, modern climatic changes, regional features, air temperature, warming trends, climatic parameters, correlations

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the state task to POI FEB RAS on theme No. 0271-2019-0003. State registration number is AAAA-A17-117030110042-2. The authors are thankful both to the software developers for opportunity of using the climatic data posted on the NOAA sites, and to the reviewer for his constructive remarks.

**For citation:** Rostov, I.D, Dmitrieva, E.V. and Rudykh, N.I., 2021. Climatic Changes of Thermal Conditions in the Pacific Subarctic at the Modern Stage of Global Warming. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(2), pp. 149-164. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-149-164

## Введение

Современное потепление в разной степени выражено над океанами и континентами почти во всех климатических зонах. Последние четыре десятилетия отличаются быстрыми изменениями климатических условий, проявляющимися в различных геосферах с существенной пространственной (от региона к региону) и временной (от сезона к сезону, от года к году) неоднородностью [1–4]. В результате планетарных изменений и произошедшего сдвига климатического режима с конца 1970-х гг. наблюдается фаза возрастания положительных трендов аномалий температуры воды и воздуха, а последние годы

стали самыми теплыми в истории наблюдений [1, 5, 6]. При этом даже медленные климатические изменения, происходящие на больших пространствах, имеют долгосрочные и широкомасштабные последствия, которые оказывают воздействие на различные сферы экономики и экологии [4, 7, 8]. Глобальные причины, региональные особенности и последствия происходящих климатических изменений разнообразны и широко обсуждаются в литературе. Отмечается, что одним из показателей этих изменений являются тенденции потепления в нижней тропосфере и значительного похолодания в нижней стратосфере на фоне ослабления зонального компонента скорости ветра [6, 9, 10]. Рост уровней концентраций парниковых газов в атмосфере продолжается, что является ключевым движущим фактором изменения климата [4, 5]. В северной части Тихого океана сдвиг климатического режима конца 1970-х гг. хорошо выражен в характеристиках межгодовых колебаний крупномасштабных аномалий метеорологических и океанографических параметров, состояния центров действия атмосферы (ЦДА), а также показателей тепло- и энергообмена океана с атмосферой [3, 4, 8, 11–14]. Важная роль в процессах формирования таких аномалий принадлежит энергоактивной зоне океана и атмосферы (ЭАЗО) северо-западной части Тихого океана и области продолжения Куросио, что связано с увеличением потоков тепла и влаги с поверхности океана в тропическом поясе и умеренных широтах и способствует усилению тропических и внетропических циклонов, адвекции тепла в высокие широты и его перераспределению между различными районами [15–20].

В целом потепление в континентальных областях идет более быстрыми темпами, чем в океанических районах, и лучше выражено в Северном полушарии (СП). В последние десятилетия тренд увеличения температуры воздуха ( $T_a$ ) над континентами СП оценивался величиной  $\sim 0,3^\circ\text{C}/10$  лет, а в северной части Тихого океана  $\sim 0,2^\circ\text{C}/10$  лет, где в летне-осенний сезон потепление более выражено. В Южном полушарии (ЮП) эти величины значительно меньше. При этом величина тренда  $T_a$  возрастает в направлении от низких широт к более высоким, а межгодовой ход сезонных температур в каждом из районов имеет свои особенности [1, 2, 4, 9]. Так, по данным наблюдений на прибрежных метеостанциях (МС), величина положительного тренда среднегодовой температуры воздуха в морях восточного сектора Арктики за последние 40 лет составила от 0,7 до  $1,5^\circ\text{C}/10$  лет [21], что значительно выше соответствующих оценок для окраинных морей западной части Тихого океана – Охотского ( $0,3\text{--}0,4^\circ\text{C}/10$  лет), Японского ( $0,2\text{--}0,3^\circ\text{C}/10$  лет), Желтого, Восточно-Китайского и Южно-Китайского ( $0,1\text{--}0,2^\circ\text{C}/10$  лет) [22]. В это же время у северо-западного побережья Америки до 2014 г. отмечалось отсутствие устойчивых тенденций к потеплению [1, 23], сменившееся периодом роста положительных аномалий температуры воды и воздуха в последние годы [6].

В настоящей работе уточняются региональные особенности межгодовых изменений приземной температуры воздуха в тихоокеанской субарктике за последние четыре десятилетия, проявляющиеся в результате планетарных изменений и сдвига климатического режима на рубеже XX–XXI вв.

Рассматриваемая акватория – это обширная зона субарктического циклонического круговорота севернее  $40^\circ$  с. ш., занимаемая водами субарктической структуры и ее модификаций [24, 25]. Большая протяженность, структурные

и циркуляционные особенности атмосферы и океана в этом районе определяют заметные различия важнейших климатических показателей в широтном и меридиональном направлениях во все сезоны года. Погодно-климатические условия определяются здесь главным образом взаимодействием трех основных барических образований, являющихся сезонными ЦДА: алеутского минимума (алеутской депрессии), северотихоокеанского (гавайского) максимума и сибирского зимнего антициклона, определяющих структуру поля ветра и состояние верхнего слоя океана. Климатические изменения, происходящие в северной части Тихого океана и тихоокеанской субарктике, через циркуляционные механизмы в атмосфере и региональные ЦДА тесно связаны с подобными явлениями в других регионах [2, 26–28] и сами оказывают влияние на происходящие глобальные процессы, являясь важным регулятором междекадных климатических колебаний [29–31].

### Данные и методы

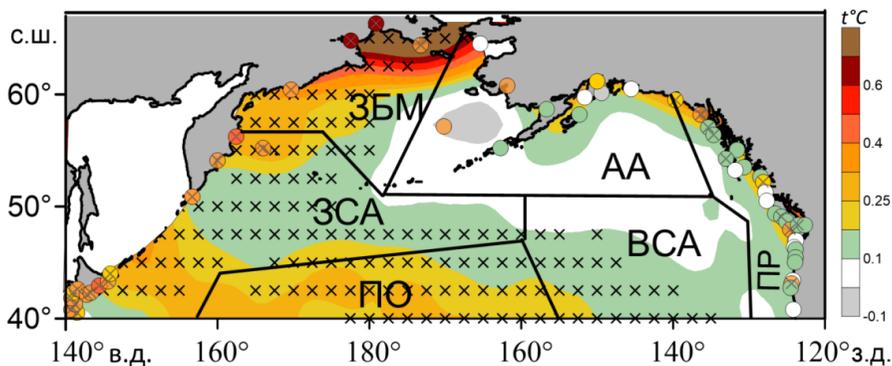
Для анализа межгодовых изменений термических условий использовались проконтролированные однородные массивы данных наблюдений температуры воздуха ( $T_{ac}$ ) на 59 метеостанциях глобальной климатической сети *GHCN-M (V3) NOAA* (<https://www.ncdc.noaa.gov/gcncm/v3.php>) за период 1978–2018 гг. В работе также были использованы сеточные данные реанализа ( $T_a$  – *NCEP/NCAR Reanalysis-1*) [32], полей давления, ветра и потоков тепла на поверхности океана, а также климатических индексов (КИ) с учетом сезонности их действия: *PDO, AMO, SOI, PTW, NP, WP, PNA, EP/NP* [22]. Рассматриваемые КИ имеют четкую географическую привязку и определенную физическую интерпретацию ([2], <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data>). Перечисленные данные получены с сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/> его разработчика: *NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA* и с сайтов *NOAA/NCEI/CPD* <https://www.nodc.noaa.gov/> и <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>. Региональные индексы алеутской (*AI*) и азиатской (*AD*) депрессий рассчитывались по величине приземного давления.

Для обеспечения сопоставимости количественных оценок с результатами, полученными для других географических районов [21, 22], применялась единая методика обработки и анализа используемых данных. Анализ структуры межгодовых изменений полей температуры воздуха, воды на поверхности океана (ТПО) и атмосферного давления проводился с применением метода разложения аномалий этих полей на главные компоненты, или эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Метод обеспечивает возможность извлечения из массивов данных наблюдений наиболее важной информации путем понижения размерности и выделения главных компонент или мод [33]. С учетом продолжительности летнего и зимнего муссонов в северо-западной части Тихого океана и внутригодового хода  $T_a$  были выделены условно теплый (июнь – сентябрь) и условно холодный (ноябрь – март) сезоны (периоды) года. Тренды оценивались для временных рядов, включающих среднегодовые значения переменных и их аномалий ( $\Delta$ ), определяемых как отклонение от средней величины за все годы 30-летнего периода 1984–2013 гг.

В данной работе 95%-ный уровень значимости трендов временных рядов вычислялся по критерию Стьюдента с использованием эффективных степеней

свободы [33], где длина временного ряда ( $N$ ) была разделена на интегральную оценку ( $T$ ), полученную из автокорреляционной функции. Расчет коэффициентов корреляции осуществлялся методом «будстрепа» [33]. Для определения коэффициента корреляции  $R$  двух временных рядов генерировалось 5000 псевдо-выборок, вычислялись обобщенные оценки коэффициента корреляции, стандартного отклонения и стандартная ошибка. Эти величины использовались для определения 95%-ного уровня значимости  $R$  по критерию Стьюдента.

С использованием данных реанализа  $T_a$  и оптимальной интерполяции температуры воды на поверхности океана (как более инерционной характеристики) за те же годы (*NOAA OI SST V2*) [34] с сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/> методами кластерного анализа по трем главным компонентам \* в тихоокеанской субарктике были выделены 6 относительно обособленных районов: западная часть Берингова моря (ЗБМ), аляскинско-алеутский (АА), западный субарктический (ЗСА), переходная область (ПО) или зона смешения [25], восточный субарктический (ВСА) и прибрежный (ПР) (рис. 1). В дальнейшем путем простого осреднения стационарных или сеточных данных в границах каждого района рассчитывался многолетний ход температуры воздуха и воды в полосе прибрежной зоны и на открытых акваториях. Относительная ошибка расчетов линейного тренда при группировке стационарных данных составила 3–6%. Колебания  $T_a$  и ТПО в каждом из выделенных районов характеризуются весьма тесными корреляционными связями –  $R > 0,9$ , а связь вариаций температур между районами существенно ниже, чем связь между ними в центре района с любой другой точкой внутри района. Отметим, что акватория Охотского моря не включена в данную схему, так как уже рассматривалась ранее [22].



**Рис. 1.** Расположение метеостанций, выделенных районов и величина трендов среднегодовой температуры воздуха за 1978–2018 гг. ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) по данным наблюдений на метеостанциях и реанализа. Крестиками обозначены узлы сетки и станции, в которых тренды статистически значимы на уровне 95%

**Fig. 1.** Scheme of location of the meteorological stations and the identified domains, the values of the annual average air temperature trends for 1978–2018 ( $^{\circ}\text{C}/10$  years) based on the meteorological stations and reanalysis data. Crosses mark the grid points and the stations where the trends are statistically significant at the 95% level

\* *Ding C., He X.* K-means clustering via principal component analysis // ICML'04: Proceedings of the twenty-first International Conference on Machine learning. Banff, Alberta, Canada : ACM Press, 2004. P. 29. doi:10.1145/1015330.1015408

## Особенности пространственной и межгодовой изменчивости температуры воздуха

Расположение выделенных районов (рис. 1) в общих чертах согласуется с естественными физико-географическими зонами субарктического региона и схемами пространственных особенностей структурных и циркуляционных характеристик его вод [24, 25]. Климатические различия выделенных районов проявляются при сопоставлении как обобщенных оценок средних и экстремальных величин колебаний температуры воздуха, так и трендов соответствующих температурных изменений (рис. 1). Годы с экстремальными значениями  $T_a$  примерно согласуются с соответствующими экстремумами в ходе среднегодовых температур во всем СП, рассчитанном авторами по данным *NCEP/NCAR Reanalysis-1* и отражающем тенденцию глобального потепления. Количественные оценки тенденций происходящих изменений в среднем за год и в отдельные сезоны приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1  
Table 1

**Тренды межгодовых изменений аномалий температуры воздуха на метеостанциях ( $T_{ac}$ ) и в выделенных районах по данным реанализа ( $T_a$ ) за период наблюдений 1978–2018 гг.**  
**Trends of interannual changes of the air temperature anomalies at the meteorological stations ( $T_{ac}$ ) and in the identified domains based on the reanalysis data ( $T_a$ ) for the observation period 1978–2018**

Район / Area	Параметр / Parameter	$b$	$Tr$	$b_T$	$b_X$
ЗБМ / WBS	$T_{ac}$	<b>0,43</b>	1,8	<b>0,45</b>	0,34
	$T_a$	<b>0,38</b>	1,6	<b>0,45</b>	0,28
АА / AA	$T_{ac}$	0,12	0,5	<b>0,17</b>	0,02
	$T_a$	0,09	0,4	0,14	0,0
ЗСА / WSA	$T_{ac}$	<b>0,29</b>	1,2	<b>0,31</b>	<b>0,28</b>
	$T_a$	<b>0,19</b>	0,8	<b>0,26</b>	<b>0,17</b>
ПО / TD	$T_a$	<b>0,24</b>	1,0	<b>0,30</b>	<b>0,22</b>
ВСА / ESA	$T_a$	0,14	0,6	<b>0,21</b>	0,05
ПР / CR	$T_{ac}$	0,15	0,6	<b>0,16</b>	0,14
	$T_a$	0,17	0,7	0,11	<b>0,20</b>
Вся акватория / Whole area	$T_a$	<b>0,20</b>	0,8	<b>0,24</b>	0,15

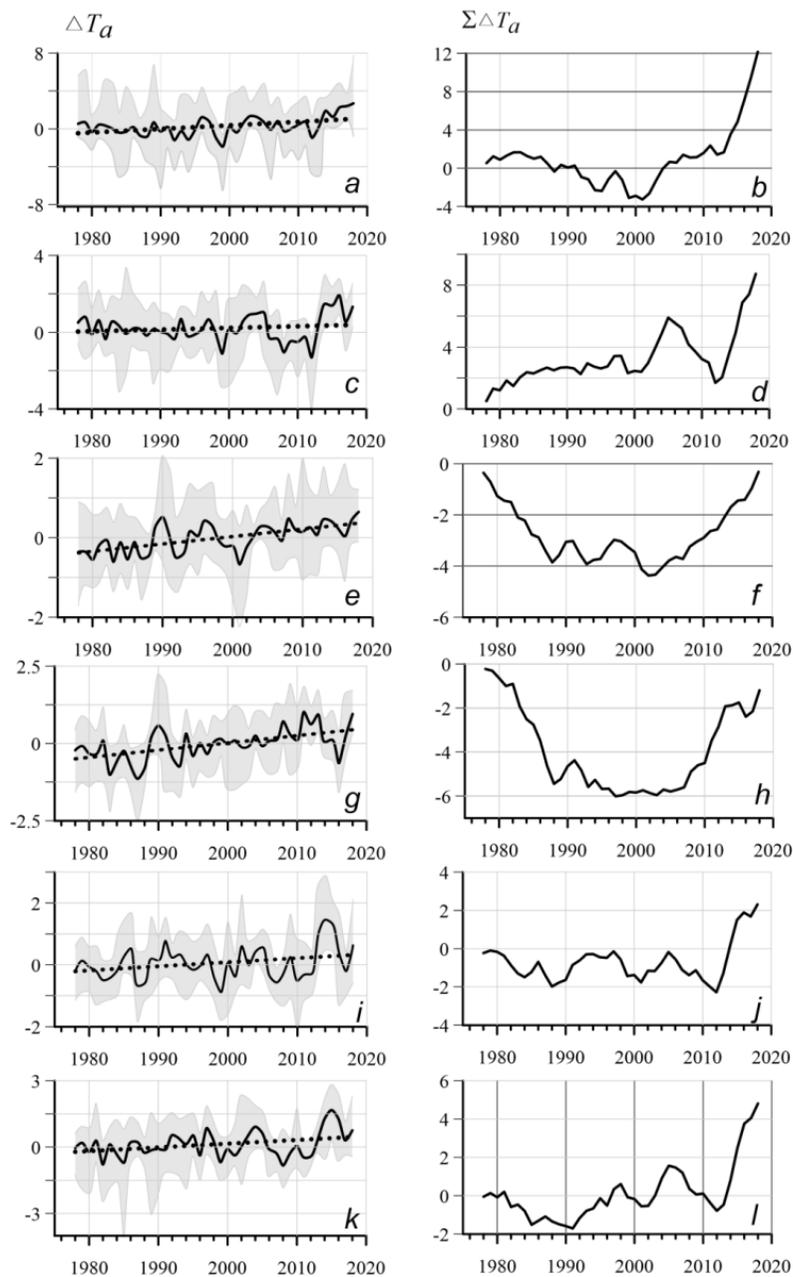
П р и м е ч а н и е.  $b$  – коэффициент наклона линейного тренда, °С за 10 лет;  $tr$  – тренд за 40 лет, °С;  $b_T$ ,  $b_X$  – величина  $b$  для теплого и холодного сезонов. Здесь и в других таблицах полужирным шрифтом выделены статистически значимые (95%) оценки.

N o t e.  $b$  is the slope coefficient of the linear trend, °C for 10 years;  $tr$  is the 40-year trend, °C;  $b_w$ ,  $b_c$  are the values of  $b$  for warm and cold seasons. Here and in the other tables, statistically significant (95%) estimates are highlighted in bold.

Тенденции потепления выражены во всех районах исследуемой области, кроме АА и ПР. В западной части субарктики величины  $b$  заметно выше, чем в восточной, где тренды  $T_a$  и  $T_{ac}$  или минимальны, или статистически не значимы, что согласуется с результатами исследований, выполненных в другие годы [1, 6, 8, 13, 23]. В северо-западной части Берингова моря (район ЗБМ, рис. 1) как по данным наблюдений на МС, так и согласно реанализу отмечаются наибольшие величины  $b$  ( $0,6^\circ\text{C}/10$  лет и  $0,9^\circ\text{C}/10$  лет соответственно), сопоставимые с оценками для морей восточного сектора Арктики за тот же период [21]. За последние 40 лет в прибрежно-островной зоне западной субарктики (ЗБМ и ЗСА) среднегодовая температура воздуха увеличилась на  $1,2\text{--}1,8^\circ\text{C}$ , а в сопредельных морских акваториях на  $0,8\text{--}1,6^\circ\text{C}$ . В переходной области (ПО) и восточной субарктике (ВСА) тренды потепления соответствовали умеренному росту  $T_a$  на  $0,6\text{--}1,0^\circ\text{C}$ , а на северо-востоке и востоке (АА и ПР) этот рост был минимален,  $\sim 0,4\text{--}0,7^\circ\text{C}$ . В целом, по данным реанализа, величина тренда среднегодовой  $T_a$  над всей акваторией тихоокеанской субарктики составила около  $0,20^\circ\text{C}/10$  лет, что соответствует потеплению на  $0,8^\circ\text{C}$  за последние 40 лет. Как правило, в теплый период года эти величины выше, чем в холодный (табл. 1).

Изменения среднегодовой  $T_a$ , как и ее аномалий ( $\Delta T_a$ ) и накопленных аномалий ( $\sum T_a$ ), в отдельных районах заметно различаются по амплитуде и синхронности колебаний, особенно в западной и восточной частях субарктики (рис. 2,  $b, f$  и  $d, i, j$ ). Наиболее тесные корреляционные связи вариаций  $\Delta T_a$  ( $R = 0,7\text{--}0,8$ ) выявлены между отдельными сопредельными районами: ЗСА/ПО и АА/ПР.

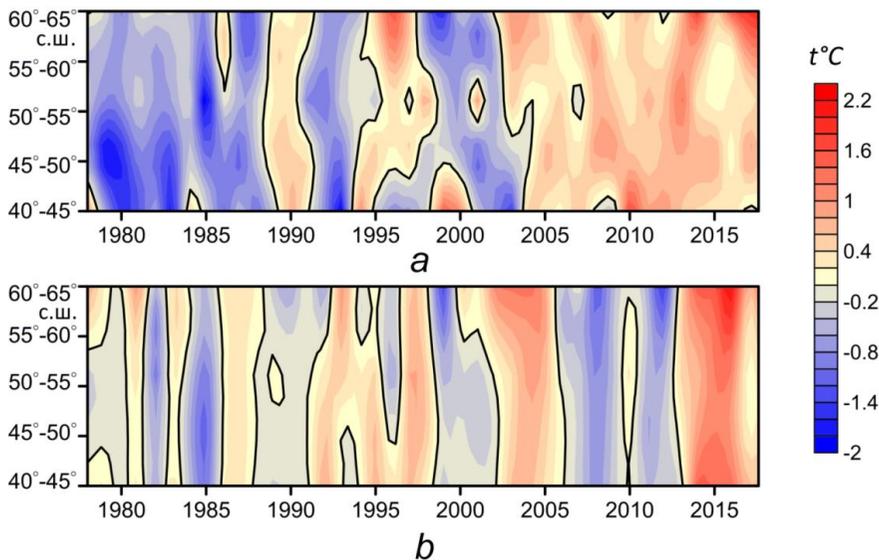
Колебания во временном ходе  $\Delta T_a$  с интервалом 2–7 лет характерны для океана и атмосферы. Они могут ассоциироваться с влиянием Эль-Ниньо с временным сдвигом в несколько месяцев на фоне тенденции общего роста  $T_a$  [4, 35, 36]. Интегральные кривые накопленных аномалий соответствуют отдельным фазам чередования теплых и холодных периодов, отмечавшимся ранее в различные годы наблюдений [1, 3, 8], которые согласуются с изменениями региональных КИ и состояния ЦДА [2, 9, 22]. Отдельные экстремумы на кривых (рис. 2) подчеркивают неоднородный характер процесса потепления в пространстве и времени. Например, в восточной части субарктики выражены максимумы 2003–2005 гг. и 2014–2016 гг. (рис. 2,  $c, i, k$ ), которые, по оценкам авторов (по данным *NCEP/NCAR Reanalysis-1*), согласуются с периодом углубления (до 995 мбар), смещения на восток и локализации области алеутской депрессии в зимний период и ослабления гавайского максимума летом. При этом с конца 1970-х до конца 1990-х гг. в аляскинско-алеутском районе (АА), в отличие от других районов тихоокеанской субарктики, наблюдалась тенденция непрерывного нарастания суммы положительных аномалий  $T_a$  (рис. 2,  $d$ ), что также связано с особенностью межгодовых изменений поля атмосферного давления в тропической и внетропической зонах Тихого океана, состояния региональных ЦДА и Эль-Ниньо [12, 37]. Согласно нашим оценкам и опубликованным данным, зимой рассматриваемые временные интервалы соответствовали периодам наибольшего обострения барического градиента между алеутской депрессией и сибирским максимумом, летом – теплой (положительной) фазе индекса *PDO* [17, 28, 38].



**Рис. 2.** Межгодовая изменчивость аномалий среднегодовой температуры воздуха  $\Delta T_a$  и накопленных аномалий  $\Sigma \Delta T_a$  в выделенных районах: ЗБМ (a, b); АА (c, d); ЗСА (e, f); ПО (g, h); ВСА (i, j); ПР (k, l). Показан диапазон внутригодовых колебаний, средние значения по району (жирные линии) и линейный тренд (пунктирные линии)

**Fig. 2.** Interannual variability of the annual average air temperature anomalies  $\Delta T_a$  and the cumulative anomalies  $\Sigma \Delta T_a$  in the identified domains: WBS (a, b); AA (c, d); WSA (e, f); TD (g, h); ESA (i, j); CR (k, l). The range of fluctuations, mean values in the region (bold lines) and linear trend (dotted lines) are shown

По данным прибрежных метеостанций, особенности динамики межгодового хода аномалий температуры воздуха в восточном и западном секторах существенно различаются, а фазы чередования более теплых и холодных лет хорошо согласованы только внутри каждого из этих секторов (рис. 3). Вместе с тем фазы изменения  $\Delta T_{ac}$  на МС согласуются с соответствующими фазами колебаний аномалий ТПО в прилегающих акваториях. Во всех широтных зонах у побережья западной части субарктики фаза устойчивого потепления выражена после 2003 г., а в восточной части она началась десятилетие спустя и продолжается по настоящее время. Так, в 2019 г. аномалии как среднегодовой  $T_a$ , так и ТПО в северо-восточной части субарктики одновременно увеличились до 1–1,5°C, что связывается с переходом *PDO* от отрицательной фазы к нейтральной, расширением субарктического круговорота, углублением алеутской депрессии, а также распространением так называемых «морских тепловых волн» и потеплением в нижней тропосфере [6, 39, 40]. Этот год стал наиболее теплым за всю историю наблюдений в районе АА.



**Р и с. 3.** Динамика межгодовых изменений аномалий среднегодовой температуры воздуха  $\Delta T_{ac}$ , °C в прибрежной зоне тихоокеанской субарктики к западу (a) и к востоку (b) от меридиана 170° з. д.

**F i g. 3.** Dynamics of interannual variability of the annual average air temperature anomalies  $\Delta T_{ac}$  °C in the coastal zone of the Pacific subarctic to the west (a) and to the east (b) of the meridian 170° W

Для получения обобщенной информации о пространственно-временных изменениях поля температуры воздуха в субарктике были вычислены ЭОФ межгодовых колебаний аномалий  $T_a$ . Главные компоненты ЭОФ дают наиболее полное представление об основных модах крупномасштабной межгодовой изменчивости поля температуры в исследуемом регионе, особенности которой можно оценить по дисперсии, трендам и связности колебаний в системе пространственных координат. Первые три моды описывают 81% вклада колебаний среднегодовых величин  $\Delta T_a$  в общую дисперсию. В теплый период года

в ходе изменений коэффициентов разложения ( $K$ ) первой ( $C_1$ ) и второй ( $C_2$ ) мод ЭОФ выражен значимый положительный тренд. В пространственном распределении первой моды максимальные значения  $C_1$  наблюдаются в области наибольших трендов среднегодовых величин  $\Delta T_a$  (район ЗБМ), а конфигурация распределения второй моды образует диполь с центрами в районах АА и ПО (рис. 1). В теплый период года межгодовые изменения этих мод связаны значимыми коэффициентами корреляции с колебаниями температуры воздуха как в различных районах субарктики, так и во всем Северном полушарии (оценки авторов по данным *NCEP/NCAR Reanalysis-1*), а также с другими климатическими переменными и показателями.

### Корреляционные связи термических условий с атмосферными процессами

Для определения причинно-следственных связей формирования областей устойчивых аномалий  $T_a$  был проведен взаимный корреляционный анализ временных рядов  $\Delta T_a$  и колебаний средних месячных аномалий поля геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа, зонального ( $U$ ) и меридионального ( $V$ ) компонентов скорости ветра, потоков скрытого и явного тепла и климатических индексов, характеризующих состояние и динамику климатической системы в тихоокеанской субарктике. В межгодовой изменчивости характеристик ветрового режима за последние четыре десятилетия прослеживаются следующие тенденции. В северо-восточной части (район АА) наблюдались статистически значимые тренды ослабления ветров южных румбов как в теплый (на 0,4 м/с), так и в холодный (на 0,8 м/с) сезоны года, в то время как в западной части (район ЗСА) – значимые тренды ослабления ветров северной четверти (на 1,1 м/с) в холодный сезон, вплоть до смены направления на противоположное после 2017 г. на большей части этой области. Подобные изменения происходили на фоне ослабления алеутской депрессии [22, 23]. Во всех выделенных районах проявляются значимые корреляционные связи колебаний  $T_a$  и компонент скорости ветра, главным образом в холодный период (табл. 2).

Различия в характере потепления в отдельных районах в значительной степени определяются величинами адвективного переноса явного ( $SH$ ) и скрытого ( $LE$ ) тепла конденсации из низких широт в высокие и зонального переноса [19, 29]. На юго-западе исследуемый район граничит с ЭАЗО Куроисио – Ойяисио, которая является мощным аккумулятором и источником тепла в сопредельные районы [16, 19, 41]. Через этот район проходят основные пути перемещения тайфунов, а циклоническая деятельность в северо-западной части Тихого океана оказывает влияние на характеристики термического режима, атмосферной и океанической циркуляции всей субарктики [15, 17–19]. По данным сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>, в области 20–40° с. ш., 125–150° в. д. с конца 1970-х гг. наблюдались устойчивые положительные тренды увеличения среднегодовых потоков  $LE$  и  $SH$  в атмосферу примерно на 4–6 Вт·м<sup>2</sup>/10 лет и 2–3 Вт·м<sup>2</sup>/10 лет соответственно и возрастание скорости южных ветров в период летнего муссона на 0,8 м/с, сопровождавшиеся уменьшением теплосодержания верхнего 700-метрового слоя [6, 13]. В тропосфере над этим же районом отмечаются максимальные скорости зонального ветра восточных румбов [19].

Межгодовые изменения потоков тепла в ЭАЗО и температуры воздуха в различных районах субарктики характеризуются умеренными положительными корреляционными связями. В холодное время года на востоке субарктики эти связи не проявляются (табл. 2).

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Коэффициенты корреляции ( $R$ ) колебаний температуры воздуха ( $T_a$ ) с  $V$ - и  $U$ -компонентами скорости ветра и величиной потоков тепла на поверхности океана во время теплого и холодного сезонов 1978–2018 гг.  
Correlation coefficients ( $R$ ) of the air temperature fluctuations ( $T_a$ ) with the wind speed  $V$ - and  $U$ -components and the heat flux values on the ocean surface during the warm and cold seasons 1978–2018**

Период года / Period of a year	$R(T_a / V)$	$R(T_a / U)$	$R(T_a / LE)$	$R(T_a / SH)$
ЗБМ / WBS				
Теплый / Warm	0,2	0,1	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
Холодный / Cold	<b>0,6</b>	-0,1	<b>0,3</b>	0,3
АА / AA				
Теплый / Warm	-0,3	0,0	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>
Холодный / Cold	<b>0,4</b>	<b>-0,5</b>	0,1	0,1
ЗСА / WSA				
Теплый / Warm	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>
Холодный / Cold	<b>0,6</b>	-0,1	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>
ПО / TD				
Теплый / Warm	0,3	0,1	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
Холодный / Cold	<b>0,3</b>	<b>-0,7</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>
BCA / ESA				
Теплый / Warm	-0,2	-0,3	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>
Холодный / Cold	<b>0,5</b>	-0,3	0,0	0,0
ПП / CR				
Теплый / Warm	0,0	0,1	<b>0,4</b>	0,3
Холодный / Cold	<b>0,4</b>	<b>-0,6</b>	-0,1	0,2

П р и м е ч а н и е.  $LE$  и  $SH$  – потоки скрытого и явного тепла для района 20–40° с. ш., 125–150° в. д.  
N o t e.  $LE$  and  $SH$  are the latent and sensible heat fluxes for the region 20–40° N, 125–150° E.

Выявленные тенденции и связи отражают региональные особенности атмосферной циркуляции и термического режима, межгодовые изменения которых являются результатом взаимодействия большого числа разномасштабных процессов, происходящих в море и атмосфере. В средней тропосфере на уровне  $AT-500$  как зональные, так и меридиональные потоки значительно усиливаются по сравнению с приземными [9]. В ходе временных коэффициентов разложения первой и третьей мод ЭОФ аномалий геопотенциала ( $\Delta H_{500}$ ) (рассматривалась вся северная часть Тихого океана) присутствовали статистически значимые положительные тренды. Пространственное распределение коэффициентов первой моды ( $C_1$ ) в теплый сезон характеризует синфазные колебания аномалий геопотенциала в пределах всей акватории с максимумом (как и для трендов  $\Delta T_a$ ) в районе ЗБМ, где величина тренда  $H_{500}$  составляла 1,4 дам/10 лет. В холодный сезон в распределении  $C_1$  выделяются два очага противофазных колебаний, образующих диполь с центрами в районе Гавайских и Алеутских о-вов, примерно совпадающими с положением ЦДА, соответствующих их названиям.

Колебания отдельных мод ЭОФ  $\Delta H_{500}$  и  $\Delta T_a$  связаны как между собой (табл. 3), так и с вариациями различных характеристик атмосферной циркуляции и состояния океана, выражаемых через региональные климатические индексы. В рассматриваемый период в ходе межгодовых колебаний большинства КИ присутствовали статистически значимые трендовые составляющие, связность с которыми отражает влияние различных крупномасштабных процессов на структуру полей давления, ветра и термические характеристики [22]. В субарктической зоне воздействие этих процессов наиболее масштабно выражено через корреляционные связи отдельных КИ ( $PDO$ ,  $NP$ ,  $SOI$ ,  $AD$ ,  $AMO$  и  $K_1$  ЭОФ  $\Delta H_{500}$ ) с основными модами изменчивости температуры воздуха исследуемого района (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Table 3

**Коэффициенты корреляции межгодовых колебаний отдельных климатических индексов (КИ) и  $K_1$  ЭОФ  $\Delta H_{500}$  с вариациями коэффициентов первых мод ЭОФ  $\Delta T_a$  в теплый (т) и холодный (х) сезоны 1978–2018 гг.**

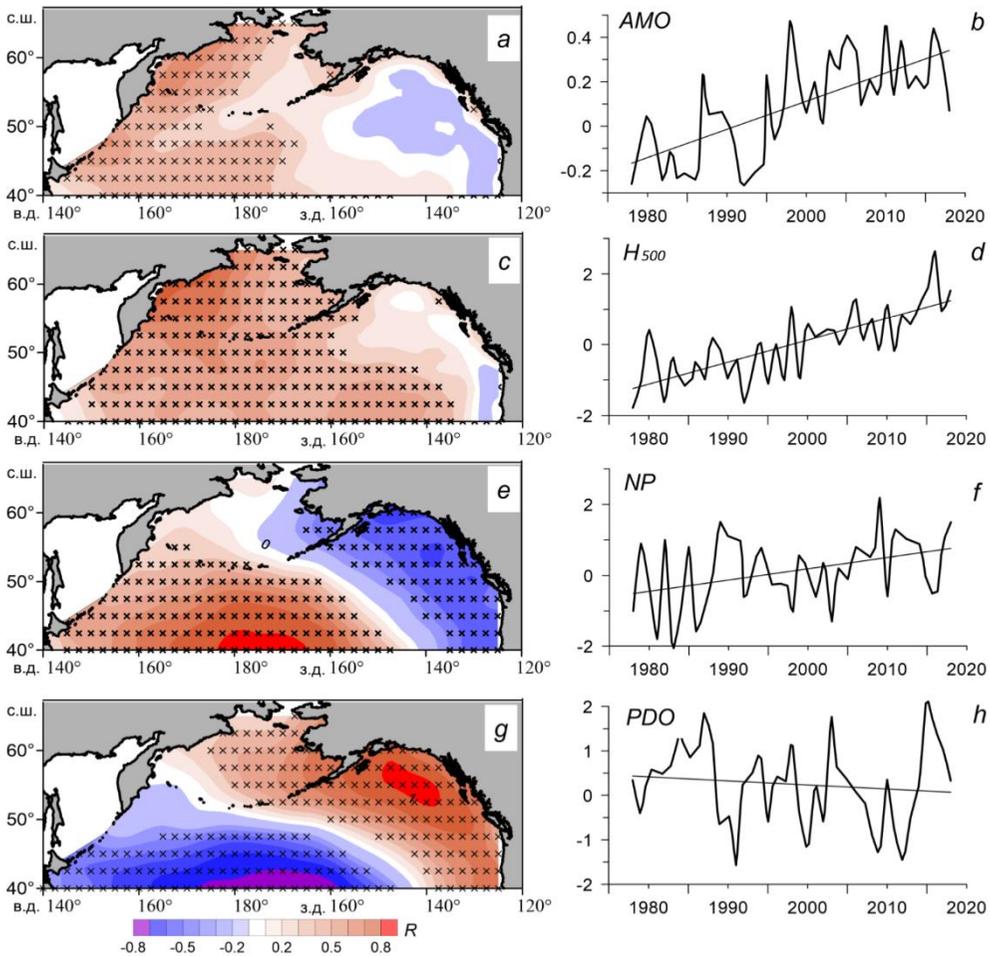
**Correlation coefficients of interannual fluctuations of the climatic indices (CI) and  $K_1$  EOF  $\Delta H_{500}$  with variations of the first modes EOF  $\Delta T_a$  coefficients in the warm (w) and cold (c) seasons for 1978–2018**

Параметры / Parameters	<i>PDO</i>		<i>NP*</i>	<i>SOI</i>		<i>AD</i>	<i>PTW</i>	<i>AMO</i>	<i>K<sub>1</sub> ΔH<sub>500</sub></i>	
	т / w	х / c	х / c	т / w	х / c	т / w	т / w	т / w	т / w	х / c
<i>b</i> (КИ) / <i>b</i> (CI)	<b>-0,2</b>	-0,1	<b>0,6</b>	0,1	<b>0,4</b>	-0,1	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>
<i>K<sub>1</sub> ΔT<sub>a</sub></i>	0,1	<b>0,5</b>	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,0	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	0,2
<i>K<sub>2</sub> ΔT<sub>a</sub></i>	<b>-0,9</b>	<b>0,6</b>	<b>-0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,7</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>-0,7</b>

П р и м е ч а н и е. *b* (КИ) – коэффициент наклона линейного тренда, усл. ед./10 лет; \* – по уточненным данным.

N o t e. *b* (CI) is the slope coefficient of the linear trend, conv. units/10 years. \* based on the updated data.

Характер соответствующих связей выражен в поле изокоррелят – пространственного распределения коэффициентов корреляции различных индексов с  $T_a$  (рис. 4). Особенности этого поля отражают основные черты пространственного распределения первой (рис. 4, *a, c*) и второй (рис. 4, *e, g*) мод ЭОФ  $\Delta T_a$ .



**Р и с. 4.** Коэффициенты корреляции ( $R$ ) колебаний температуры воздуха с вариациями климатических индексов *AMO* (*a*), *NP* (*e*), *PDO* (*g*), первой моды  $C_1(\Delta H_{500})$  (*c*) и межгодовые изменения этих параметров в теплый (*b, d*) и холодный (*f, h*) периоды года. Крестиками обозначены узлы сетки, в которых  $R$  статистически значимы на уровне 95%

**Fig. 4.** Correlation coefficients ( $R$ ) of the air temperature fluctuations with variations of the climatic indices *AMO* (*a*), *NP* (*e*), *PDO* (*g*) and the first mode  $C_1(\Delta H_{500})$  (*c*); the interannual changes of these parameters in warm (*b, d*) and cold (*f, h*) periods of a year. Crosses denote the grid points in which  $R$  are statistically significant at the 95% level

Умеренные корреляционные связи, которые отражают локальные и сезонные особенности полей изокоррелят, выражены также со следующими КИ: западно-тихоокеанским (*WP*), тихоокеанским/североамериканским (*PNA*) и во-

сточно-тихоокеанским/северотихоокеанским (*EP/NP*). Статистически значимые корреляционные связи рассмотренных КИ с коэффициентами третьей моды ЭОФ  $\Delta T_a$ , описывающей 9% суммарной дисперсии поля температуры, отсутствуют. Подобные связи в теплый период года проявляются с колебаниями третьей моды аномалий поля геопотенциала ( $R = 0,5$ ), в холодный период – с индексом осцилляции северотихоокеанского круговорота (*NPGO* – <http://www.oces.us/npgo/>) ( $R = -0,4$ ).

При наличии тесной корреляционной связи колебаний температуры воздуха и ТПО отмеченные особенности изменения этих климатических параметров хорошо согласуются между собой, а анализ соответствующих изменений в нижележащих слоях толщи вод требует отдельного рассмотрения. Предварительный анализ имеющихся данных показал, что изменения температуры воды и аномалий теплосодержания в толще вод исследуемых районов происходят крайне неравномерно, что связано с особенностями циркуляции атмосферы и океана и является следствием перераспределения тепла между отдельными слоями толщи вод и различными районами путем горизонтальной адвекции.

### Заключение

Тенденции глобального потепления на рубеже XX–XXI вв. выражены в трендах (*b*) межгодовой изменчивости приземной температуры воздуха и других климатических характеристик, а их величина указывает на существенные региональные различия происходящих изменений. Так, на западе тихоокеанской субарктики скорость потепления значительно выше, чем на востоке, где температурные тренды или минимальны, или статистически не значимы. В северо-западной части Берингова моря как по данным наблюдений на МС, так и согласно реанализу отмечаются наибольшие величины *b* ( $0,6^\circ\text{C}/10$  лет и  $0,9^\circ\text{C}/10$  лет соответственно), сопоставимые с оценками для морей восточного сектора Арктики за тот же период. Во всех широтных зонах у побережья западной части субарктики фаза устойчивого потепления выражена после 2003 г., в восточной части – только десятилетие спустя. Здесь, в северо-восточной части района, к 2019 г. аномалии среднегодовой  $T_a$  достигли максимума за всю историю наблюдений. В пределах морских акваторий южной части субарктики тренды потепления соответствовали умеренному росту  $T_a$  на  $0,1–0,3^\circ\text{C}$  за десятилетие, а величина тренда среднегодовой  $T_a$  над всей акваторией тихоокеанской субарктики оценивается в  $0,20^\circ\text{C}/10$  лет. Как правило, в теплый период года эта величина выше, чем в холодный.

Во всех выделенных районах, главным образом в холодный период года, отчетливо проявляются положительные корреляционные связи между увеличением  $T_a$  и колебаниями меридионального компонента скорости ветра, а ослабление северных ветров и усиление южных в этот период сопровождается потеплением над океаном.

На различия в характере потепления в отдельных районах субарктики в значительной степени влияет адвективный перенос явного и скрытого тепла из ЭАЗО Курисио – Ойясио, которая является мощным аккумулятором и источником тепла для сопредельных районов. В ней с конца 1970-х гг. наблюда-

лись устойчивые положительные тренды увеличения этих потоков, способствующих усилению циклонической активности и общему потеплению в субарктике.

Отдельные фазы чередования теплых и холодных периодов в межгодовом ходе  $T_a$  согласуются с тенденциями изменений поля давления, характеристик ЦДА и климатических индексов, связность с которыми свидетельствует об усилении или ослаблении влияния различных крупномасштабных процессов на термические условия региона в различные сезоны года. В субарктической зоне воздействие этих процессов наиболее масштабно выражено через корреляционные связи отдельных КИ ( $PDO$ ,  $NP$ ,  $SOI$ ,  $AD$ ,  $AMO$  и  $K_1$  ЭОФ  $\Delta H_{500}$ ) с основными модами изменчивости температуры воздуха исследуемого района.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Географические и сезонные особенности современного глобального потепления / Г. В. Груза [и др.] // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 2. С. 41–62.
2. Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Региональные климатические изменения в Северном полушарии и их взаимосвязь с циркуляционными индексами // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2010. Т. 23. С. 92–108.
3. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus / М. Н. England [et al.] // *Nature Climate Change*. 2014. Vol. 4. P. 222–227. doi:10.1038/nclimate2106
4. 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. T. F. Stocker [et al.]. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2013. 1585 p.
5. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. Geneva :WMO, 2020. 40 p. No. 1248. (WMO. No. 1248). URL: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10211](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211) (date of access 23.10.2020).
6. State of the Climate in 2019 / Eds. J. Blunden, D. S. Arndt // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2020. Vol. 101, iss. 8. P. S1–S429. <https://doi.org/10.1175/2020BAMSStateoftheClimate.1>
7. Decadal-Scale Climate and Ecosystem Interactions in the North Pacific Ocean / A. J. Miller [et al.] // *Journal of Oceanography*. 2004. Vol. 60. P. 163–188. doi:10.1023/B:JOCE.0000038325.36306.95
8. Hare S. R., Mantua N. J. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989 // *Progress in Oceanography*. 2000. Vol. 47, iss. 2–4. P. 103–145. doi:10.1016/S0079-6611(00)00033-1
9. *Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М.* Динамика тропо- и стратосферы и изменения современного климата // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 1. С. 211–231.
10. Observed Temperature Changes in the Troposphere and Stratosphere from 1979 to 2018/ A. K. Steiner [et al.] // *Journal of Climate*. 2020. Vol. 33, iss. 19. P. 8165–8194. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0998.1>
11. Interannual to Decadal Variability of the Upper-Ocean Heat Content in the Western North Pacific and its Relationship to Oceanic and Atmospheric Variability / H. Na [et al.] // *Journal of Climate*. 2018. Vol. 31, iss. 13. P. 5107–5125. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0506.1>
12. Johnson N. C., Feldstein S. B. The Continuum of North Pacific Sea Level Pressure Patterns: Intraseasonal, Interannual, and Interdecadal variability // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23, iss. 4. P. 851–867. doi:10.1175/2009JCLI3099.1
13. Johnson G. C., Lyman J. M. Warming trends increasingly dominate global ocean // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 757–761. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0822-0>

14. On the Pacific Ocean regime shift / C. Stephens [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 18, iss. 19. P. 3721–3724. <https://doi.org/10.1029/2000GL012813>
15. Role of the Gulf Stream and Kuroshio–Oyashio Systems in Large-Scale Atmosphere–Ocean Interaction: A Review / Y.-O. Kwon [et al.] // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23, iss. 12. P. 3249–3281. doi:10.1175/2010JCLI3343.1
16. Рождественский А. Е., Мальшиев Г. А. К оценке источников и стоков тепла в атмосфере Северного полушария // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Метеорология*. 2016. № 45. С. 142–150.
17. Глебова С. Ю. Циклоны над Тихим океаном и дальневосточными морями в холодные и теплые сезоны и их влияние на ветровой и термический режим в последний двадцатилетний период // *Известия ТИПРО*. 2018. Т. 193. С. 153–166. doi:10.26428/1606-9919-2018-193-153-166
18. O'Reilly C. H., Czaja A. The response of the Pacific storm track and atmospheric circulation to Kuroshio Extension variability // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2015. Vol. 141, iss. 686. P. 52–66. <https://doi.org/10.1002/qj.2334>
19. Impacts of North Pacific Subtropical and Subarctic Oceanic Frontal Zones on the Wintertime Atmospheric Large-Scale Circulations / J. Huang [et al.] // *Journal of Climate*. 2020. Vol. 33, iss. 5. P. 1897–1914. doi:10.1175/JCLI-D-19-0308.1
20. Lee, T., Fukumori I., Tang B. Temperature Advection: Internal versus External Processes // *Journal of Physical Oceanography*. 2004. Vol. 34, iss. 8. P. 1936–1944. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1936:TAIVER>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1936:TAIVER>2.0.CO;2)
21. Климатические изменения термических условий Карского моря за последние 40 лет / И. Д. Ростов [и др.] // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65, № 2. С. 125–147. doi:10.30758/0555-2648-2019-65-2-125-147
22. Климатические изменения термических условий окраинных морей западной части Тихого океана / И. Д. Ростов [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 3. С. 44–57.
23. Spring Aleutian Low Weakening and Surface Cooling Trend in Northwest North America During Recent Decades / C. Sun [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. Vol. 124, iss. 22. P. 12078–12092. <https://doi.org/10.1029/2019JD031405>
24. Тихий океан. Т. 2. Гидрология Тихого океана / Отв. ред. проф. А. Д. Добровольский. М. : Наука, 1968. 524 с.
25. Favorite F., Dodimead A. J., Nasu K. Oceanography of the Subarctic Pacific Region, 1960–71. Vancouver, Canada : International North Pacific Fisheries Commission, 1976. P. 1–187. (Bulletin / International North Pacific Fisheries Commission ; no. 33).
26. Linkages between the North Pacific Oscillation and central tropical Pacific SSTs at low frequencies / J. C. Furtado [et al.] // *Climate Dynamics*. 2012. V. 39. P. 2833–2846. doi:10.1007/s00382-011-1245-4
27. An Atlantic-driven rapid circulation change in the North Pacific Ocean during the late 1990s. / C.-R. Wu [et al.] // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. 14411. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51076-1>
28. Ocean Circulation Signatures of North Pacific Decadal Variability / R. C. J. Wills [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46, iss. 3. P. 1690–1701. <https://doi.org/10.1029/2018GL080716>
29. *Cayan D. R.* Latent and Sensible Heat Flux Anomalies over the Northern Oceans: Driving the Sea Surface Temperature // *Journal of Physical Oceanography*. 1992. Vol. 22, iss. 8. P. 859–881. doi:10.1175/1520-0485(1992)022<0859:LASHFA>2.0.CO;2
30. Honda M., Yamane S., Nakamura H. Inter-Basin Link between the North Pacific and North Atlantic in the Upper Tropospheric Circulation: Its Dominance and Seasonal Dependence // *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. 2007. Vol. 85, iss. 6. P. 899–908. <https://doi.org/10.2151/jmsj.85.899>
31. Potential global climatic impacts of the North Pacific Ocean / L. Wu [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32, iss. 24. L24710. doi:10.1029/2005GL024812

32. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77, iss. 3. P. 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2
33. *Emery W. J., Thomson R. E.* Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Elsevier Science, 2001. 654 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50756-3.X5000-X>
34. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate / R.W. Reynolds [et al.] // *Journal of Climate*. 2002. Vol. 15, iss. 13. P. 1609–1625. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2
35. *Frankignoul C., Sennechal N.* Observed Influence of North Pacific SST Anomalies on the Atmospheric Circulation // *Journal of Climate*. 2007. Vol. 20, iss. 3. P. 592–606. doi:10.1175/JCLI4021.1
36. *Liu Q., Wen N., Liu Z.* An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere // *Geophysica Research Letters*. 2006. Vol. 33, iss. 18. L18611. doi:10.1029/2006GL026082
37. *Deser C., Phillips A. S., Hurrell J. W.* Pacific Interdecadal Climate Variability: Linkages between the Tropics and the North Pacific during Boreal Winter since 1900 // *Journal of Climate*. 2004. Vol. 17, iss. 16. P 3109–3124. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3109:PICVLB>2.0.CO;2
38. *Sugimoto, S., Hanawa K.* 2009. Decadal and Interdecadal Variations of the Aleutian Low Activity and Their Relation to Upper Oceanic Variations over the North Pacific // *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II. 2009. Vol. 87, iss. 4. P. 601–614. doi:10.2151/jmsj.87.601
39. Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave / D. J. Amaya [et al.] // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. 1903. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15820-w>
40. *Di Lorenzo E., Mantua N.* Multi-year persistence of the 2014/15 North Pacific marine heatwave // *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6. P. 1042–1047. doi:10.1038/NCLIMATE3082
41. *Dunxin H., Maochang C.* The Western Boundary Current of the Pacific and its role in the climate // *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 1991. Vol. 9. P. 1–14. doi:10.1007/BF02849784

*Об авторах:*

**Ростов Игорь Дмитриевич**, заведующий лабораторией информатики и мониторинга океана ФГБУН ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5081-7279**, [rostov@poi.dvo.ru](mailto:rostov@poi.dvo.ru)

**Дмитриева Елена Витальевна**, старший научный сотрудник, лаборатория информатики и мониторинга океана ФГБУН ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0094-5296**, [e\\_dmitrieva@poi.dvo.ru](mailto:e_dmitrieva@poi.dvo.ru)

**Рудых Наталья Ивановна**, старший научный сотрудник, лаборатория информатики и мониторинга океана ФГБУН ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат географических наук, **ResearcherID: N-5821-2018**, [rudykh@poi.dvo.ru](mailto:rudykh@poi.dvo.ru)