

## Межгодовая изменчивость термических характеристик верхнего 1000-метрового слоя внутропической зоны северо-западной части Тихого океана на рубеже XX–XXI веков

И. Д. Ростов , Е. В. Дмитриева, Н. И. Рудых

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

Поступила в редакцию 13.06.2022; одобрена после рецензирования 06.12.2022;  
принята к публикации 16.01.2023.

### Аннотация

**Цель.** Определить тенденции и пространственно-временные особенности межгодовых изменений температуры воды на поверхности (ТПО) и в верхнем 1000-метровом слое внутропической зоны северо-западной части Тихого океана и дать анализ их возможных причинно-следственных связей с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере за отдельные фазы современного периода глобального потепления.

**Методы и результаты.** Для анализа данных климатических массивов NOAA использовались методы кластерного, корреляционного, регрессионного анализа и аппарата эмпирических ортогональных функций. Полученные результаты позволили охарактеризовать тенденции межгодовой динамики термических характеристик верхнего, промежуточного и глубинного слоев отдельных районов при различных условиях 20-летних фаз 40-летнего периода современных климатических изменений и дать количественную оценку их особенностей и статистической значимости.

**Выводы.** В целом по региону в обе фазы современного периода климатических изменений наблюдались положительные статистически значимые тренды среднегодовой ТПО, величина которых в 1982–2000 гг. была в 1,3–1,5 раза выше, чем в 2000–2021 гг. В течение второго периода площадь области с положительными трендами ТПО значительно сократилась и локализовалась в северо-западной части исследуемой акватории. В отличие от ТПО положительные тренды температуры воды в толще вод верхнего 1000-метрового слоя в этот период прослеживаются на большей части исследуемой акватории. Наиболее масштабно корреляционные связи вариаций теплосодержания верхнего слоя океана с процессами в океане и атмосфере проявляются через климатические индексы *NPGO*, *PDO*, *WP*, *PTW* и аномалии поля геопотенциала  $\Delta H_{500}$ .

**Ключевые слова:** северо-западная часть Тихого океана, внутропическая зона, современные климатические изменения, региональные особенности, температура воды, тренды потепления, климатические индексы, корреляционные связи

**Благодарности:** работа выполнена в рамках Комплексной межведомственной программы «Экологическая безопасность Камчатки: изучение и мониторинг опасных природных явлений и антропогенных воздействий» (НИОКТР 122012700198-9).

**Для цитирования:** Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И. Межгодовая изменчивость термических характеристик верхнего 1000-метрового слоя внутропической зоны северо-западной части Тихого океана на рубеже XX–XXI веков // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 157–176. EDN ALOUMA. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-157-176

© Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И., 2023

## Interannual Variability of Thermal Characteristics of the Upper 1000-meter Layer in the Extratropical Zone of the Northwestern Part of the Pacific Ocean at the Turn of the XX–XXI Centuries

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](mailto:rostov@poi.dvo.ru)

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the study is to determine the trends and the spatio-temporal features of interannual changes in the sea surface temperature (SST) and in the upper 1000-meter layer in the extratropical zone of the northwestern Pacific Ocean, and to analyze their possible causal relationships with the large-scale and regional processes in the ocean and atmosphere over the certain phases of the modern period of global warming.

**Methods and Results.** To analyze the NOAA climatic data sets, the methods of cluster, correlation and regression analysis, and also the apparatus of empirical orthogonal functions were used. The results obtained made it possible to characterize the trends in interannual dynamics of thermal characteristics of the upper, intermediate and deep layers in the certain areas under various conditions of the 20-year phases of the 40-year period of modern climate changes, and to quantify their features and statistical significance.

**Conclusions.** In general, in the above region during the both phases of the modern period of climate changes, observed were the positive statistically significant trends in the annual average SST, the values of which in 1982–2000 were 1.3–1.5 times higher than those in 2000–2021. During the second period, the area of positive SST trends decreased significantly and was localized in the northwestern part of the area under study. In contrast to the SST, at the same period, positive trends of the water column temperature in the upper 1000-m layer were traced over most of the area under study. The correlations between the variations in the ocean upper layer heat content and the processes in the ocean and atmosphere are most extensively manifested through the climatic indices *NPGO*, *PDO*, *WP*, *PTW*, and the anomalies in the geopotential field  $\Delta H_{500}$ .

**Keywords:** northwestern part of the Pacific Ocean, extratropical zone, modern climate changes, regional features, water temperature, warming trends, climate indices, correlations

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of the Comprehensive Interdepartmental Program “Ecological Safety of Kamchatka: Study and Monitoring of Hazardous Natural Phenomena and Human Impacts” (NIOKTR 122012700198-9).

**For citation:** Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V. and Rudykh, N.I., 2023. Interannual Variability of Thermal Characteristics of the Upper 1000-meter Layer in the Extratropical Zone of the Northwestern Part of the Pacific Ocean at the Turn of the XX–XXI Centuries. *Physical Oceanography*, 30(2), pp. 141–159. doi:10.29039/1573-160X-2023-2-141-159

### Введение

В условиях современного глобального потепления основные тенденции межгодовой и междекадной изменчивости термических характеристик вод океана являются как отражением природной цикличности и внутренней динамики климатической системы океан – атмосфера – континент, так и следствием ее энергетического дисбаланса в результате усиливающегося антропогенного воздействия на эти геосферы, приводящего к накоплению избыточ-

ного тепла [1, 2]. Прослеживаются отдельные фазы с различной скоростью потепления, формирующиеся при смене климатических режимов, характеристик крупномасштабной атмосферной и океанической циркуляции, удаленного воздействия и под влиянием локальных физико-географических условий [3, 4].

Отдельные десятилетия, называемые фазами ускоренного потепления, характеризуются быстрым повышением средней глобальной температуры приземного воздуха ( $T_a$ ) и температуры поверхности океана (ТПО), другие – ослаблением тенденций к потеплению, или фазами перерыва в этом процессе [5]. Так, на рубеже XX–XXI вв. произошли сдвиги климатического режима планеты в сторону ускоренного потепления в конце 1970-х гг. [3], после которого последовала пауза (*hiatus*), начавшаяся в конце 1990-х гг., а глобальное потепление в течение первого десятилетия XXI в. замедлилось или даже остановилось [3, 5, 6]. Вместе с тем эта пауза является результатом перераспределения тепла внутри и между океанами, а не показателем изменения темпов потепления всей Земли [7], тенденции которого продолжают доминировать [1]. Примерно с 2012 г. глобальная поверхностная температура вновь стала повышаться по сравнению с климатическими нормами <sup>1</sup>. Исследуемый район охватывает акватории западной части Берингова моря – на севере, ячейки западного субарктического циклонического круговорота – в центре, энергоактивную зону (ЭАЗО) Курисио – Ойясио – на юго-западе, а также области переходной межструктурной зоны и Продолжения Курисио – на юге. В нем расположены зоны субарктической, субтропической структур вод и их модификаций, разделенные субарктическим фронтом и зоной смешения, характеристики которых, как и схема основных течений региона, хорошо изучены [8–11]. Большая протяженность, циркуляционные особенности атмосферы и океана являются причинами существенных различий погодно-климатических условий в этом районе, которые зависят здесь, главным образом, от взаимодействия трех основных барических образований, являющихся сезонными центрами действия атмосферы (ЦДА): алеутского минимума (алеутской депрессии), северотихоокеанского (гавайского) максимума и сибирского зимнего антициклона, которые определяют характеристики поля ветра и состояние верхнего слоя океана. Важная роль в процессах формирования крупномасштабных аномалий термических характеристик атмосферы и океана и термического режима исследуемого района принадлежит ЭАЗО Курисио – Ойясио. С ней связано увеличение потоков тепла и влаги с поверхности океана в результате адвекции тепла из тропиков в умеренные и высокие широты и его перераспределение между различными районами. Важнейшее влияние ЭАЗО оказывает на процессы, происходящие не только в сопредельных областях океана, но и в климатической системе Земли [4, 12].

В межгодовой изменчивости аномалий ТПО (АТПО), теплосодержания верхних слоев океана и атмосферного давления прослеживается влияние не-

---

<sup>1</sup> IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / eds. H.-O. Pörtner [et al.]. IPCC, 2019. 755 p. In press. URL: <https://www.ipcc.ch/report/srocc> (date of access: 09.06.2022).

скольких главных доминирующих режимов – крупномасштабных мод колебаний в системе океан – атмосфера, вызванных как ее внутренней изменчивостью, так и удаленным воздействием [2, 4]. Они параметризуются соответствующими климатическими индексами (КИ): *AMO*, *IPO*, *NP*, *NPGO*, *PDO*, *SOI* и *WP* [13, 14]. Существенный вклад в вариации температуры воды ( $T_w$ ) на поверхности и в нижележащих слоях вносят флуктуации потока Продолжения Куроисио и положения фронтальных зон [2, 15, 16]. Внутренняя изменчивость этих мод, как и отдельных КИ, является комбинацией различных процессов [2] и определяется положением и выраженностью ЦДА в различные сезоны, а удаленное воздействие – процессами планетарного масштаба [14].

Исследуемый район является своеобразным индикатором и ключом к пониманию современных экосистемных тенденций, прослеживающихся на акватории Тихого океана, где климатические сигналы могут быть обнаружены раньше, чем последующие изменения климатического режима [11, 17]. В последние четыре десятилетия на его акватории отмечалась наибольшая в пределах всего бассейна Тихого океана скорость увеличения  $T_a$  и ТПО, а вклад тренда в суммарную дисперсию среднегодовой ТПО достигал 30–40% [4, 18]. Наибольшие тренды этих параметров наблюдались в западной части Берингова моря и у восточного побережья Камчатки. Одновременно в ряде районов северо-западной части Тихого океана отмечались тренды увеличения  $T_w$  на различных горизонтах [17] и теплосодержания верхнего 700-метрового слоя [2].

Последние годы стали одними из самых теплых в истории наблюдений, что не могло не сказаться на состоянии экосистем региона. Осенью 2020 г. на акватории Авачинской бухты и в других районах юго-восточного побережья Камчатки произошла экологическая катастрофа, которая сопровождалась изменением цвета и появлением пены на поверхности воды и привела к массовой гибели морских гидробионтов (до 95% бентоса) <sup>2</sup> [19]. Подобные явления, обусловленные вспышкой массового цветения вредоносных водорослей и получившие название «красные приливы», наблюдались в бухтах Камчатки в отдельные годы и ранее, в 2021 г. они вновь повторились в районе Южных Курил и у восточного побережья о. Хоккайдо. В эпоху современных климатических изменений частота и масштаб «красных приливов» существенно возросли, и динамика этих взаимосвязей требует дальнейшего всестороннего изучения [11]. В настоящее время недооцененными являются региональные особенности, количественные характеристики и трехмерная структура климатических трендов межгодовых изменений термических характеристик исследуемого района на основе совокупности имеющихся данных наблюдений, современных ассимиляционных моделей и реанализа. В последние годы одновременно с развертыванием дистанционных автономных наблюдательных систем и буев создаются, совершенствуются и находят все более широкое применение в ходе исследований климата океана и перспективные системы усвоения (ассимиляции) океанографических данных, такие как *SODA* и *GODAS* [2]. Так, за период 2000–2021 гг. по северо-западной части Тихого океана резко увеличилась доля

---

<sup>2</sup> Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2020 году / Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. Петропавловск-Камчатский, 2021. 385 с. URL: <https://kamgov.ru/files/6175d246c94f93.62211833.pdf> (дата обращения: 20.02.2023).

информации, поступающей в базы данных и систему *GODAS* с наблюдательной сети ныряющих буев *ARGO*, – до 314 тыс. профилей (без учета окраинных морей) [20]. Далее в настоящей работе использовались данные *GODAS* именно за этот период.

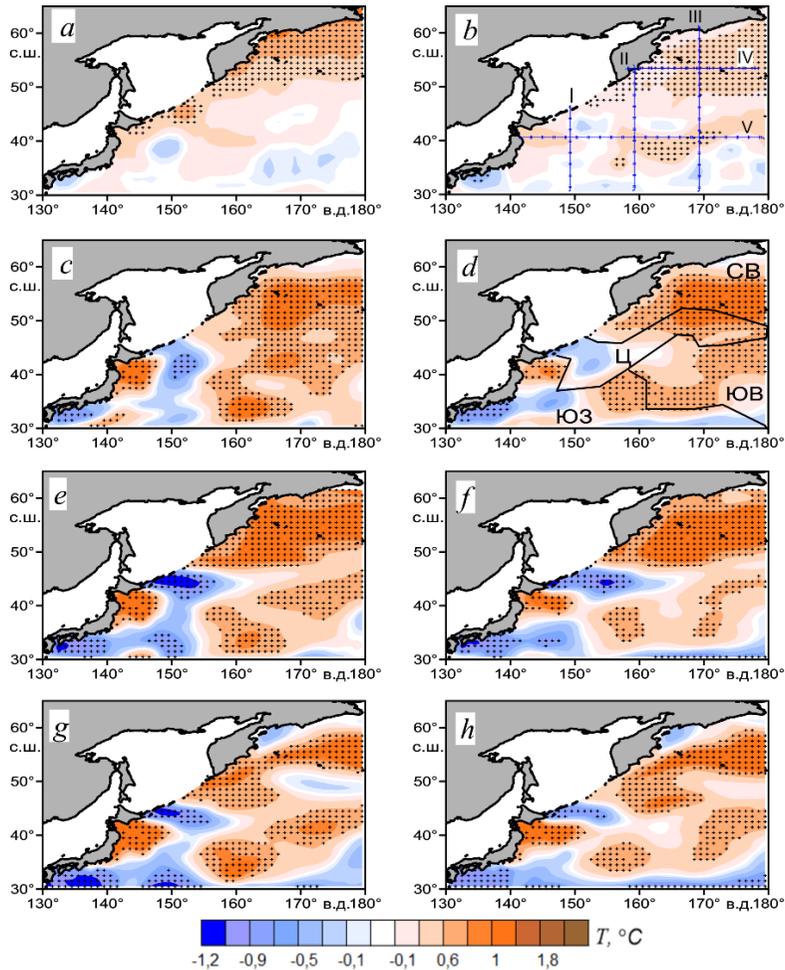
Цель исследований – определение тенденций и пространственно-временных особенностей межгодовых изменений ТПО и температуры воды верхнего 1000–метрового слоя в исследуемом районе и анализ их возможных причинно-следственных связей с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере за отдельные фазы современного 40-летнего периода глобального потепления. Использование совокупности имеющихся данных наблюдений, современных ассимиляционных моделей и реанализа позволило описать трехмерную структуру изменчивости температуры воды в различных районах, охарактеризовать степень неоднородности реакции акваторий исследуемых регионов на происходящие глобальные климатические изменения и дать количественную оценку их региональных особенностей.

### Данные и методы

Для анализа межгодовых изменений температуры воды использовались данные оптимальной интерполяции температуры на поверхности океана (ТПО на сетке  $1^\circ \times 1^\circ$ ) *NOAA OI SST V2* за 1982–2021 гг. (раздел сайта <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>), а также потенциальной температуры на различных горизонтах из модели системы усвоения океанографических данных *GODAS* [21] в узлах сетки  $0,3^\circ \times 1^\circ$  (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.godas.html>) за 2000–2021 гг. и материалы постоянно пополняемой базы данных *WOD18* [20]. Использовались также данные реанализа полей давления, ветра и потоков тепла на поверхности океана и ряды климатических (циркуляционных) индексов [14]: *AMO*, *NP*, *NPGO*, *PDO*, *SOI*, *WP* с учетом их сезонности. Перечисленные данные были получены с сайтов *NOAA* <https://psl.noaa.gov/data/gridded/index.html> и <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>.

Проводился расчет статистик и разложение полей аномалий исследуемых рядов на главные компоненты ЭОФ по единой методике [4], дополненной регрессионным анализом. Также по данным *GODAS* были рассчитаны величины аномалий интегральной температуры ( $\Delta Q_T$ ) (пропорциональные аномалиям теплосодержания без учета соответствующих констант и объемных характеристик) в узлах сетки для различных слоев от поверхности до глубины 950 м [18]. С учетом продолжительности летнего и зимнего муссонов и внутригодового хода  $T_a$  и ТПО были выбраны условно теплый, летний (июнь – сентябрь), и условно холодный, зимний (ноябрь – март), сезоны (периоды) года. С использованием данных по межгодовой изменчивости ( $\Delta Q_T$ ) верхнего слоя 5–200 м в зимний сезон методами кластерного анализа по трем главным компонентам ЭОФ выделены четыре обособленных района, расположенных в различных частях акватории региона: северо-восточный (СВ), центральный (Ц), юго-восточный (ЮВ) и юго-западный (ЮЗ) (рис. 1, *d*). В дальнейшем путем простого осреднения сеточных данных в этих районах рассчитывался многолетний ход аномалий температуры воды на каждом из 31 горизонта *GODAS*

и интегральной средней температуры в отдельных слоях – верхнем, подповерхностном (5–200 м), промежуточном (200–460 м) и глубинном (460–950 м).



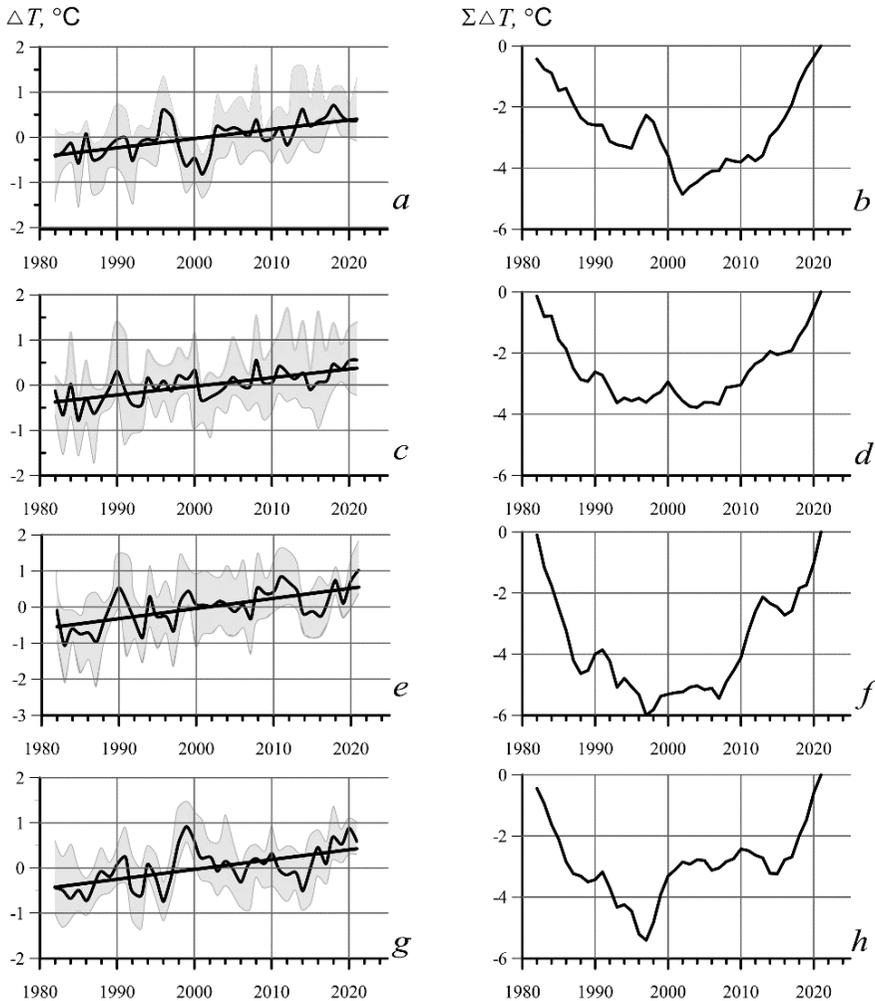
**Р и с. 1.** Тренды аномалий ТПО, °C/10 лет (*a, b*) и нормализованных величин аномалий интегральной температуры ( $\Delta Q_T$ ) в слоях 5–200 м (*c, d*), 200–460 м (*e, f*), 460–950 м (*g, h*) в теплый (слева) и холодный (справа) сезоны за 2000–2021 гг. Здесь и далее крестиками обозначены узлы сетки, в которых оценки статистически значимы на уровне 95%. На фрагменте *b* показано расположение разрезов (I–V), на фрагменте *d* – выделенных районов (CB, Ц, ЮЗ, ЮВ)

**Fig. 1.** Values of the SST, °C/10 years (*a, b*) and the normalized heat content anomalies ( $\Delta Q_T$ ) trends in the layers 5–200 m (*c, d*), 200–460 m (*e, f*) and 460–950 m (*g, h*) in the warm (left) and cold (right) seasons for 2000–2021. Here and below, crosses denote the grid nodes in which the estimates are statistically significant at the 95% level. Fragment *b* shows the location of sections (I–V), and fragment *d* – the identified areas (NE, C, SW, SE)

### Особенности пространственной и межгодовой изменчивости температуры воды

Расположение выделенных районов в общих чертах согласуется с положением структурных зон, фронтальных границ и схемой основных приповерх-

ностных течений [9–11]. Так, в границах северо-восточного (СВ) района располагается субарктическая структура вод, в границах юго-западного (ЮЗ) – субтропическая. Границы центрального (Ц) района примерно соответствуют расположению субарктического течения и фронта, юго-восточного (ЮВ) – переходной зоне или зоне смешения субарктических и субтропических вод [9, 15]; северная граница юго-западного (ЮЗ) района на западе – зоне смешения Ойясио и северо-восточной ветви Куроисио [8], а восточнее – стрещию Продолжения Куроисио, переходящего в Северо-Тихоокеанское течение, идущее на восток [16].



**Р и с. 2.** Межгодовая изменчивость аномалий среднегодовой ТПО ( $\Delta T$ ) и накопленных аномалий ( $\Sigma\Delta T$ ) в выделенных районах: СВ (*a, b*), Ц (*c, d*), ЮВ (*e, f*), ЮЗ (*g, h*) в 1982–2021 гг. Показан диапазон внутригодовых колебаний, средние значения по району и линейный тренд (жирные линии)

**F i g. 2.** Interannual variability of the annual average SST ( $\Delta T$ ) and the cumulative ( $\Sigma\Delta T$ ) anomalies in the identified domains: NE (*a, b*), C (*c, d*), SE (*e, f*) and SW (*g, h*) in 1982–2021. The ranges of intra-year fluctuations, mean values over the region and linear trend (bold lines) are shown

Межгодовые изменения аномалий ТПО (АТПО) и накопленных АТПО в отдельных районах за весь 40-летний период различаются по амплитудному составу и синхронности колебаний (рис. 2). В целом по региону в обе фазы (периода) климатических изменений (1982–2000 и 2000–2021 гг.) наблюдались положительные статистически значимые тренды среднегодовой ТПО, величина которых на первой фазе была в 1,3–1,5 раза выше, чем на второй (табл. 1). В течение первой фазы в теплый сезон области максимальных положительных статистически значимых трендов (~ 0,5–1,2°C/10 лет) располагались вдоль всей западной границы исследуемого района и в юго-западной части акватории, в холодный сезон – главным образом в ее южном секторе, к востоку от побережья Японии (рисунок не приводится).

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

Тенденции межгодовых изменений АТПО в исследуемых районах за два периода: 1982–2000 и 2000–2021 гг.  
Trends of interannual changes of the SST anomalies in the identified domains for two periods: 1982–2000 and 2000–2021

Район / Area	$\sigma^2$	$b$	$D$	$tr$	$b_w/b_w$	$b_c/b_c$
1982–2000 гг.						
СВ / NW	0,11	0,14	6	0,3	0,33	0,08
Ц / С	0,11	<b>0,35</b>	35	0,7	<b>0,48</b>	<b>0,45</b>
ЮВ / SE	0,24	0,42	23	0,8	0,45	<b>0,57</b>
ЮЗ / SW	0,24	<b>0,54</b>	40	1,0	<b>0,56</b>	<b>0,59</b>
Вся акватория / Whole area	0,09	<b>0,36</b>	45	0,7	<b>0,45</b>	<b>0,42</b>
2000–2021 гг.						
СВ / NW	0,13	<b>0,41</b>	52	0,9	<b>0,57</b>	<b>0,34</b>
Ц / С	0,07	<b>0,24</b>	34	0,5	0,27	0,18
ЮВ / SE	0,15	0,24	17	0,5	0,10	0,27
ЮЗ / SW	0,12	0,17	9	0,4	0,12	0,15
Вся акватория / Whole area	0,06	<b>0,26</b>	50	0,5	<b>0,26</b>	<b>0,23</b>

П р и м е ч а н и е.  $\sigma^2$  – дисперсия среднегодовой ТПО;  $b$  – коэффициент наклона линейного тренда среднегодовой температуры, °C за 10 лет;  $D$  – вклад тренда в суммарную дисперсию, %;  $tr$  – тренд за период наблюдений, °C;  $b_w, b_c$  – величина  $b$  для теплого и холодного сезонов. Здесь и в других таблицах полужирным шрифтом выделены статистически значимые (95%) оценки.

N o t e.  $\sigma^2$  is variance of the average annual SST;  $b$  is the slope coefficient of the average annual temperature linear trend, °C for 10 years;  $D$  is the trend contribution to the total variance, %;  $tr$  is the trend over the observation period, °C;  $b_w, b_c$  are the values of  $b$  for the warm and cold seasons. Here and in the other tables, the statistically significant (95%) estimates are highlighted in bold.

В течение второго периода величина положительных трендов в среднем по всей акватории уменьшилась и рост ТПО замедлился (табл. 1).

В отличие от трендов АТПО положительные статистически значимые тренды потепления толщи вод 5–1000 м прослеживаются на большей части исследуемой акватории (рис. 1,  $c - h$ ), что соответствует современным региональным и глобальным тенденциям<sup>1</sup> [2, 22]. Пространственно-временные

<sup>1</sup> IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / eds. H.-O. Pörtner [et al.]. IPCC, 2019. 755 p. In press. URL: <https://www.ipcc.ch/report/srocc> (date of access: 09.06.2022).

особенности распределения трендов ( $\Delta Q_T$ ) в различных слоях формируются в результате сложного взаимодействия разнообразных процессов на поверхности и в толще океана. Первые три моды разложения на ЭОФ поля межгодовых колебаний интегральной температуры в слое 5–200 м отражают главные особенности внутренней структуры этого поля и описывают большую часть (~ 60%) суммарной дисперсии  $\Delta Q_T$ .

Области с отрицательными и положительными трендами  $\Delta Q_T$ , расположенные в юго-западной части исследуемой акватории, можно связать с влиянием локальных особенностей гидрологического режима и изменившегося водообмена с прилегающими районами Филиппинского, Японского и Охотского морей. В этот период в районе ЭАЗО Курисио, к югу от Японии, наблюдались наибольшие потоки и тренды явного и скрытого тепла на поверхности моря и выхолаживание всей толщи вод 1000-метрового слоя [12], что видно на рис. 1, *c – h*. Другая область с отрицательными трендами  $\Delta Q_T$ , расположенная в районе центральных и южных Курильских о-вов, могла сформироваться в результате усиления потока Ойясио и поступления более холодных охотоморских вод [8, 11]. Область с положительными трендами  $\Delta Q_T$ , расположенная южнее о. Хоккайдо и прилегающая к Сангарскому проливу, сформировалась в результате водообмена с прилегающими районами восточной части Японского моря, где в последние десятилетия наблюдались аномальный рост теплосодержания в толще вод верхнего 300-метрового слоя и усиление расходов через проливы [23].

### **Межгодовая изменчивость термических характеристик верхнего 1000-метрового слоя**

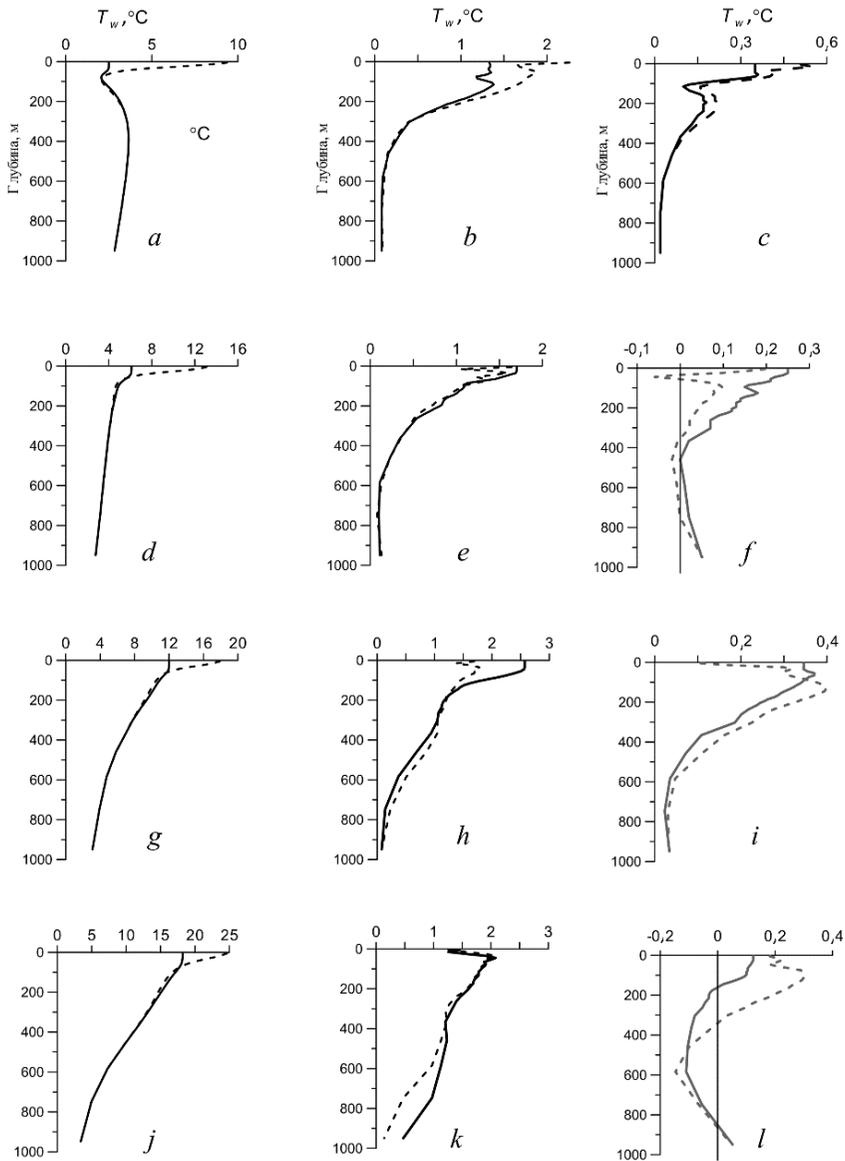
На рис. 3 показано вертикальное распределение  $T_w$ , диапазон ее изменчивости и тренд температуры на различных горизонтах, осредненные в пределах выделенных районов. Максимальные величины сезонных изменений  $T_w$  (2,6°C) наблюдались в холодный сезон (рис. 3, *h*) в верхнем 50-метровом слое района ЮВ. Как и в других районах [12], связь между изменениями температуры на различных горизонтах проявляется в вертикальных профилях трендов  $T_w$  (рис. 3, *c, f, i, l*). В районах СВ и ЮВ наблюдается потепление всей толщи вод верхних 1000 м в оба сезона. В пределах верхнего и промежуточного слоев тренды имеют максимальные значения 0,4–0,6°C/10 лет, которые превосходят соответствующие значения для ТПО (табл. 1).

В других районах знаки тренда  $T_w$  чередуются в зависимости от глубины (рис. 3, *f, l*). Максимальное потепление верхнего и промежуточного слоев происходило в северо-восточном районе и несколько меньшее – в юго-восточном (увеличение на 18–20% и 5–8% соответственно), что и отмечается на рис. 1 и 3. В целом по исследуемому району за последние два десятилетия теплосодержание верхнего 1000-метрового слоя увеличилось на 3%.

Сопоставление рис. 1 и 4 позволяет рассмотреть особенности трехмерной структуры температурных аномалий и трендов потепления/похолодания как внутри каждого района, так и на всей акватории.

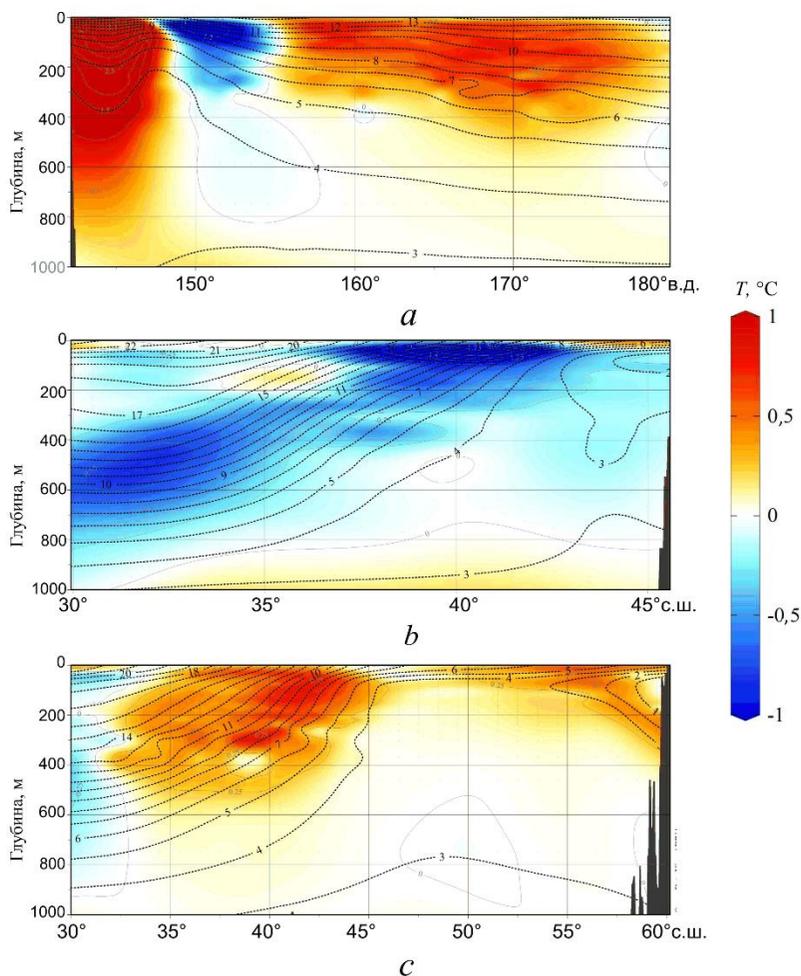
Северный зональный разрез IV вдоль 53° с. ш. (рис. 1, *b*) целиком расположен в северо-восточном районе. В толще вод этого разреза (рисунок не приводится) в оба сезона были выражены только положительные величины тренда

$T_w$ , что полностью согласуется с картами трендов теплосодержания отдельных слоев (рис. 1) и кривыми вертикального распределения тренда (рис. 3). На южном зональном разрезе V по  $40^\circ$  с. ш. (рис. 4, *a*) прослеживаются области потепления большей части толщи вод в районах ЮВ и ЮЗ и локальная зона выхолаживания верхнего 300-метрового слоя в районе Ц между ними.



**Р и с. 3.** Обобщенные кривые вертикального распределения  $T_w$  (*a, d, g, j*), диапазона ее изменений (*b, e, h, k*) и тренда (*c, f, i, l*) в теплый (штриховая) и холодный (сплошная) сезоны 2000–2021 гг. Сверху вниз: районы СВ, Ц, ЮВ, ЮЗ

**F i g. 3.** Generalized curves of vertical distribution  $T_w$  (*a, d, g, j*), range of its changes (*b, e, h, k*) and trend (*c, f, i, l*) in the warm (dotted line) and cold (solid line) seasons in 2001–2021. From top to bottom: the areas NE, C, SE and SW



**Р и с. 4.** Совмещенное вертикальное распределение среднегодовой  $T_w$  (пунктирные линии) и трендов аномалий температуры (выделены цветом) в теплый период 2000–2021 гг. на зональном V (по  $40^\circ$  с. ш.) (a) и меридиональных I (по  $150^\circ$  в. д.) (b) и III (по  $170^\circ$  в. д.) (c) разрезах. Расположение разрезов показано на рис. 1, b

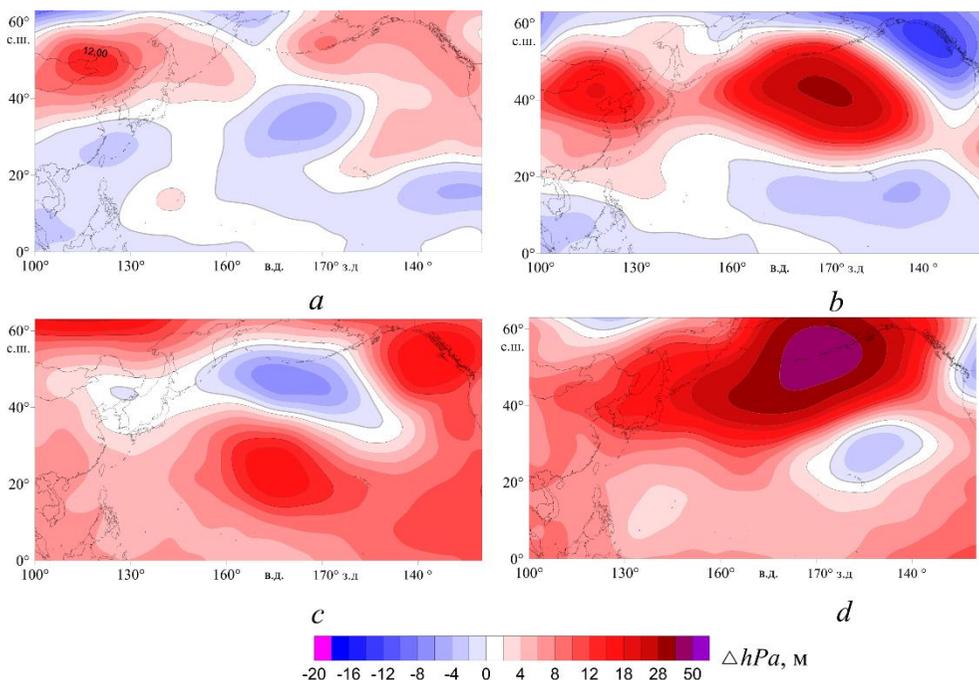
**Fig. 4.** Joint vertical distribution of the average annual  $T_w$  (dotted lines) and the temperature anomaly trends (highlighted in color) at the zonal V (at  $40^\circ$  N) (a) and meridional I (at  $150^\circ$  E) (b) and III (at  $170^\circ$  E) (c) sections for the warm period in 2000–2021. The section locations are shown in Fig. 1, b

Меридиональный разрез I по  $150^\circ$  в. д. (рис. 4, b) пересекает районы Ц и ЮЗ. На границе этих районов, в центральной части разреза, где расположена зона субарктического фронта, в верхнем слое наблюдаются наибольшие горизонтальные градиенты температуры и область отрицательных трендов  $T_w$ , до  $-0,8 \dots -0,9^\circ\text{C}/10$  лет. Другая область наибольшего выхолаживания локализована в слое 300–600 м в районе ЮЗ, что существенно превосходит глубину проникновения сезонных колебаний с поверхности [17]. Причиной формирования этой аномалии может быть адвекция вод с запада. В этом слое отмечались отрицательные тренды  $T_w$  в толще вод ЭАЗО Курошио к югу от Японии

[12]. Положительные статистически значимые тренды потепления на этом разрезе не выражены. Меридиональный разрез III вдоль 170° в. д. (рис. 4, с) пересекает акваторию всех четырех выделенных районов. В 800-метровом слое его южной части также прослеживается область с ослабленными, по сравнению с показанными на разрезе I, отрицательными трендами  $T_w$ . К северу от нее на всем протяжении района ЮВ располагается область максимального потепления толщи вод верхнего и промежуточного слоев, до 0,5–0,7°C/10 лет. Данные обоих разрезов хорошо согласуются с картами трендов теплосодержания отдельных слоев (рис. 1).

### Корреляционные связи изменчивости термических характеристик с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере

Корреляционные связи, характеризующие влияние различных циркуляционных механизмов и крупномасштабных аномалий барического и термического полей в океане и атмосфере на региональные особенности термического режима исследуемого района, сложны и многообразны [4, 12, 24]. Был проведен взаимный корреляционный и регрессионный анализ временных рядов межгодовых аномалий ТПО и аномалий интегральной температуры ( $\Delta Q_T$ ) в слое 0–200 м с климатическими индексами и другими параметрами, характеризующими состояние и динамику климатической системы за два периода: 1982–2000 гг. (первый период) и 2000–2021 гг. (второй период).



**Рис. 5.** Тренды аномалий геопотенциала  $\Delta H_{500}$  в 1980–2000 гг. (a, b) и в 2000–2021 гг. (c, d) в теплый (слева) и холодный (справа) сезоны

**Fig. 5.** Trends in the geopotential  $\Delta H_{500}$  anomalies in 1980–2000 (a, b) and 2000–2021 (c, d) for the warm (left) and cold (right) seasons

Одним из важных климатических показателей, характеризующих состояние барической системы, является поле геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа ( $AT_{500}$ ) в средней тропосфере. Вариации главных мод ЭОФ аномалий геопотенциала ( $\Delta H_{500}$ ) в регионе тесно связаны с колебаниями ТПО, поля ветра и различных климатических индексов [4, 12]. В оба сезона в течение 1982–2021 гг. при переходе от первого ко второму периоду на большей части внетропической зоны океана наблюдались смена знака тренда аномалий  $\Delta H_{500}$  и формирование области его положительных значений в центре района, до 3–4 дам/10 лет (рис. 5). При переходе от первого ко второму периоду в северной части района исследований в холодный сезон наблюдалось статистически значимое ослабление ветров северных румбов и, как отмечалось выше, уменьшение трендов ТПО в целом по акватории примерно в 1,5 раза.

В связи с перестройкой атмосферной циркуляции величина и знак трендов климатических индексов ( $b$ ), как и характер корреляционных связей колебаний ТПО и наиболее значимых КИ, также изменились (табл. 2).

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Коэффициенты корреляции ТПО выделенных районов с климатическими индексами (КИ) в теплый и холодный (в скобках) сезоны за два периода в течение 1982–2021 гг.**  
**Correlation coefficients of SST in the identified areas with climate indices (CI) for the warm and cold (in brackets) seasons for two periods during 1982–2021**

Показатель и районы / Index and areas	$K_1\Delta H_{500}$	$PDO$	$NP$	$AD$	$AMO$	$NPGO$	$IPO$
1982–2000 гг.							
$b$	0,1 (0,4)	0,5 (-0,7)	-(0,6)	-0,2 (-)	<b>0,2 (0,1)</b>	0,1 (0,0)	-0,4 (-0,4)
СВ / NE	-0,4 (0,1)	0,2 (0,2)	-(0,1)	0,1 (-)	0,1 (0,1)	-0,3 (-0,4)	0,1 (0,2)
Ц / С	0,2 (0,3)	<b>-0,7 (-0,7)</b>	-(0,3)	<b>-0,5 (-)</b>	0,2 ( <b>0,5</b> )	0,4 (0,0)	<b>-0,6 (-0,1)</b>
ЮВ / SE	<b>0,6 (0,5)</b>	<b>-0,9 (-0,9)</b>	-( <b>0,5</b> )	<b>-0,5 (-)</b>	0,3 (0,3)	0,4 (0,0)	<b>-0,7 (-0,3)</b>
ЮЗ / SW	<b>0,6 (0,1)</b>	<b>-0,8 (-0,6)</b>	-(0,3)	<b>-0,6 (-)</b>	<b>0,5 (0,6)</b>	<b>0,7 -0,3</b>	<b>-0,6 (-0,2)</b>
Весь р-он / Whole area	0,4 (0,4)	<b>-0,8 (-0,8)</b>	-(0,4)	<b>-0,5 (-)</b>	0,4 ( <b>0,5</b> )	0,4 (0,0)	<b>-0,6 (-0,2)</b>
2000–2021 гг.							
$b$	<b>0,7 (0,6)</b>	0,3 (0,4)	-( <b>1,4</b> )	0,0 (-)	0,0 (0,0)	<b>-1,5 (-1,6)</b>	0,0 (0,2)
СВ / NE	0,3 ( <b>0,6</b> )	0,2 (0,3)	-( <b>0,4</b> )	0,0 (-)	0,3 (0,2)	-0,4 ( <b>-0,8</b> )	-0,1 (0,2)
Ц / С	0,2 ( <b>0,6</b> )	-0,3 ( <b>-0,5</b> )	-( <b>0,6</b> )	0,0 (-)	0,2 (-0,1)	0,0 ( <b>-0,4</b> )	-0,4 (-0,3)
ЮВ / SE	-0,1 ( <b>0,6</b> )	<b>-0,7 (-0,6)</b>	-( <b>0,6</b> )	0,3 (-)	0,1 (0,0)	0,4 (-0,2)	-0,4 ( <b>-0,5</b> )
ЮЗ / SW	<b>-0,5 (-0,2)</b>	-0,1 (-0,3)	-(0,1)	0,2 (-)	-0,2 (0,2)	-0,2 (-0,1)	-0,4 (-0,1)
Весь р-он / Whole area	0,3 ( <b>0,6</b> )	-0,3 ( <b>-0,4</b> )	-( <b>0,7</b> )	-0,3 (-)	0,2 (0,1)	-0,1 ( <b>-0,5</b> )	<b>-0,5 (-0,3)</b>

П р и м е ч а н и е.  $b$  – коэффициент наклона линейного тренда КИ, усл. ед./10 лет;  $K_1\Delta H_{500}$  – временные коэффициенты ЭОФ первой моды вариаций аномалий геопотенциала.

N o t e.  $b$  is the slope coefficient of the CI linear trend, conv. units/10 years; ( $K_1\Delta H_{500}$ ) are the EOF time coefficients of the first mode of geopotential anomaly variations.

Данные табл. 2 указывают на существенно неоднородный характер связей межгодовой изменчивости ТПО с крупномасштабными процессами (КИ), которые в различных районах согласуются только по знаку коэффициентов корреляции. В целом по региону в течение второго периода (2000–2021 гг.) усилилось влияние на ТПО таких показателей динамики атмосферы и океана, как  $K_1\Delta H_{500}$ ,  $NP$ ,  $WP$  и  $NPGO$ . Вместе с тем воздействие  $PDO$ ,  $AD$ ,  $AMO$  и  $IPO$  в этот период ослабло. Механизмы этих процессов, участвующих в формировании аномалий полей ТПО, теплосодержания и их аномалий, являются предметом самостоятельных и многочисленных исследований, в ходе которых показано, что тепловая структура верхнего слоя определяется в основном бюджетом тепла на поверхности, флуктуациями ветра, течений и удаленным воздействием. В промежуточном и глубинном слоях в большей мере отражается влияние адвекции и перемешивания вод [2, 12, 13, 22, 25]. По сравнению с ТПО наиболее масштабно (по площади влияния, длительности и величине коэффициента корреляции) в последние два десятилетия соответствующие корреляционные связи вариаций интегральной температуры в слое 5–200 м и различных индексов проявляются со следующими КИ:  $NPGO$ ,  $PDO$ ,  $WP$ ,  $PTW$ , а также с  $K_1\Delta H_{500}$  (рис. 6).

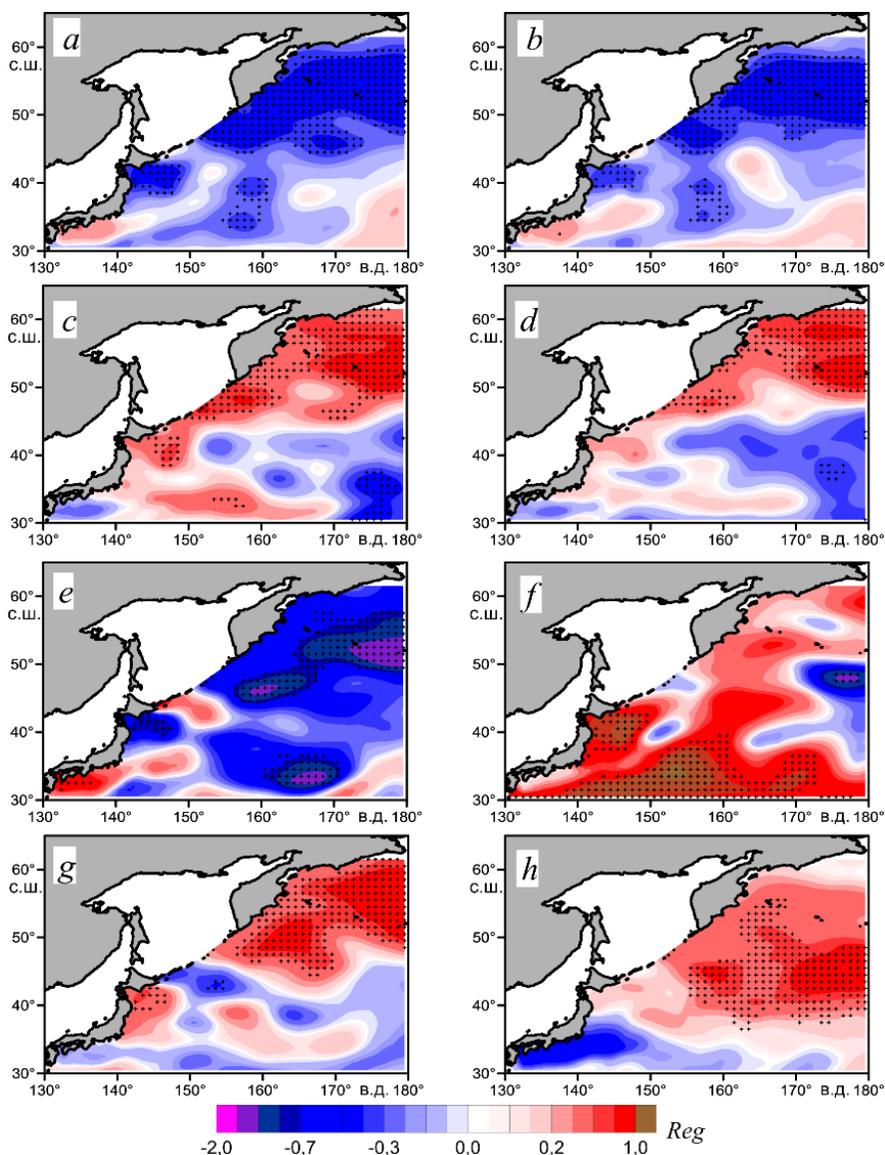
Интересно отметить, что в районе исследований статистически значимые связи  $SOI$  с колебаниями теплосодержания и ТПО не выражены.

Также в юго-западной части акватории прослеживаются статистически значимые связи вариаций  $\Delta Q_T$  (5–200 м) и величины потоков явного ( $SH$ ) и скрытого ( $LH$ ) тепла на поверхности в области ЭАЗО Куроисио на севере Филиппинского моря [12], как и связи термических условий с положением оси Куроисио, его интенсивности и тепловыми характеристиками [2, 15, 22, 25–27]. Здесь, в полосе широт между  $25^\circ$  и  $45^\circ$  с. ш., океан передает в атмосферу через эти потоки  $\sim 70\%$  тепла, накопленного в экваториальной зоне [24].

В целом первые три моды ЭОФ межгодовых колебаний поля аномалий интегральной температуры верхнего слоя 5–200 м ( $\Delta Q_T$ ) описывают главные особенности его структуры, 60% изменчивости (меньше, чем для ТПО) и тесно связаны с крупномасштабными процессами в океане и атмосфере (табл. 3).

Корреляционные связи межгодовых колебаний  $\Delta Q_T$  в верхнем слое с различными КИ ослабевают по мере увеличения номера моды и ее вклада в суммарную дисперсию изменчивости интегральной температуры. В нижележащих слоях эти связи проявляются с временным лагом 6–12 мес и более, что связано с крупномасштабными особенностями циркуляции океана и атмосферы в исследуемом районе [2, 28]. Ниже приведены оценки величин коэффициентов детерминации (доля объясненной дисперсии  $D$ , %) множественной регрессии вклада совокупности колебаний различных климатических переменных (КИ) за теплый и холодный (в скобках) сезоны и первой – третьей мод ЭОФ среднегодовых аномалий интегрального содержания тепла в слое 5–200 м:

$-K_1\Delta Q_T$ : *NPGO*, ( $K_1\Delta H_{500}$ ), *PNA*, *WP*,  $K_2\Delta H_{500}$ , (*NP*):  $D = 79\%$ ,  
 $-K_2\Delta Q_T$ : *PDO*, ( $K_2\Delta H_{500}$ ), (*EP-NP*), *LH*,  $K_3\Delta H_{500}$ , *PTW*:  $D = 70\%$ ,  
 $-K_3\Delta Q_T$ : (*WP*), (*SH*), (*LH*):  $D = 63\%$ .



**Рис. 6.** Коэффициенты линейной регрессии (*Reg*) колебаний аномалий среднегодовых величин интегральной температуры ( $\Delta Q_T$ ) в слое 5–200 м с климатическими индексами: *NPGO* (*a*, *b*), *PDO* (*c*, *d*), *WP* (*e*, *f*) и  $K_1\Delta H_{500}$  (*g*, *h*) в теплый (слева) и холодный (справа) сезоны 2000–2021 гг.  
**Fig. 6.** Linear regression coefficients (*Reg*) of fluctuations in anomalies of the annual average values of the integral temperature ( $\Delta Q_T$ ) in the 5–200 m layer with the climatic indices: *NPGO* (*a*, *b*), *PDO* (*c*, *d*), *WP* (*e*, *f*) and  $K_1\Delta H_{500}$  (*g*, *h*) in the warm (left) and cold (right) seasons, 2000–2021

**Коэффициенты корреляции среднегодовых величин главных компонент ЭОФ аномалий среднегодовой интегральной температуры в слое 5–200 м с различными КИ в 2000–2021 гг.**  
**Correlation coefficients of the average annual values of the EOF anomaly main components of the average annual integral temperature in the 5–200 m layer with different CIs in 2000–2021**

Показатель / Index	<i>PDO</i>	<i>WP</i>	<i>NP (x)</i>	<i>NPGO</i>	<i>PNA</i>	$K_1\Delta H_{500}$	$K_2\Delta H_{500}$
$K_1\Delta Q_T$	0,3 (0,3)	<b>-0,5</b> (0,2)	- ( <b>0,4</b> )	<b>-0,7</b> (-0,7)	<b>0,5</b> (-0,4)	<b>0,5</b> ( <b>0,6</b> )	<b>-0,5</b> (0,4)
$K_2\Delta Q_T$	<b>-0,6</b> (-0,6)	0,0 (0,2)	- (0,3)	0,4 (0,3)	0,1 (-0,2)	-0,1 (0,1)	0,3 ( <b>0,5</b> )
$K_3\Delta Q_T$	0,1 (0,0)	0,0 ( <b>0,8</b> )	- (-0,1)	-0,1 (-0,1)	0,3 (0,4)	0,2 (-0,4)	-0,3 (0,1)

Примечание.  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  – временные коэффициенты первых мод ЭОФ разложений полей  $\Delta Q_T$  и  $\Delta H_{500}$ .

Note.  $K_1$ ,  $K_2$ , and  $K_3$  are the time coefficients of the EOF first modes of decomposition of the  $\Delta Q_T$  and  $\Delta H_{500}$  fields.

Здесь КИ расположены в порядке убывания статистической значимости регрессионных связей с каждой из мод. Наибольший вклад в изменчивость первой моды обеспечивают процессы, параметризуемые *NPGO* [13], второй – *PDO*, третьей – *WP* [14]. Механизмы этих связей сложны и неоднозначны. В ряде исследований отмечается, что с 1990-х гг. в северной части Тихого океана происходила интенсификация субарктического (субполярного) круговорота, а также расширение и смещение к полюсу субтропического круговорота и траекторий циклонов и тайфунов<sup>1</sup> [10, 16, 25], которые становятся более частыми [29]. Одним из показателей десятилетней динамики системы течений региона является индекс *NPGO*, в тенденциях изменений которого в последние два десятилетия наблюдались значимые отрицательные тренды (табл. 2). Колебания *NPGO* отражают изменение интенсивности крупномасштабного северотихоокеанского циклонического круговорота [13]. Его колебания обусловлены вариациями ветрового апвеллинга и горизонтальной адвекции регионального и бассейнового масштабов и являются частью режима изменчивости климата, что проявляется в тенденциях колебаний уровня океана [25], ТПО и теплосодержания (табл. 2, 3, рис. 6, *a*, *b*). Изменчивость *NPGO* оказывает удаленное и запаздывающее воздействие на систему течений Куроисио – Ойясио и прилегающие районы западной части Тихого океана с некоторой фазовой задержкой.

В исследуемый период частота явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья также остается подверженной внутренней десятилетней изменчивости, но без выраженного долгосрочного тренда в их интенсивности, а статистически значимые связи с колебаниями термических характеристик в исследуемом районе не выражены.

<sup>1</sup> IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / eds. H.-O. Pörtner [et al.]. IPCC, 2019. 755 p. In press. URL: <https://www.ipcc.ch/report/srocc> (date of access: 09.06.2022).

Углубление области положительных аномалий тренда поля давления (геопотенциал  $AT_{500}$ ) в северо-восточной части океана в последние десятилетия свидетельствует об ослаблении алеутской депрессии, перестройке атмосферной (индекс  $NP$ ) и океанической (индекс  $NPGO$ , являющийся океаническим выражением  $NP$  [2, 13]) циркуляции и сопровождается потеплением толщи вод на большей части исследуемого района (табл. 2, рис. 1).

Тихоокеанское десятилетнее колебание ( $PDO$ ) также является доминирующим фактором изменчивости ТПО в северной части Тихого океана в десятилетней шкале времени [30, 31]. Из-за усиления стратификации в процессе глобального потепления в начале XXI в. десятилетняя изменчивость  $PDO$  значительно подавляется, его амплитуда уменьшается, а десятилетний цикл смещается в более высокочастотную полосу [32]. В этот период влияние  $PDO$  на ТПО уменьшилось и проявлялось только в связях со второй модой теплосодержания (табл. 2, 3). Аналогичные тенденции ослабления до статистически не значимых корреляционных связей ТПО и мод ЭОФ теплосодержания верхнего слоя наблюдаются как для индексов  $AMO$  и  $IPO$  – атлантического и тихоокеанского междесятилетних колебаний, так и для  $AD$  – азиатской депрессии.

### Заключение

На рубеже XX–XXI вв. прослеживаются отдельные периоды с различной скоростью потепления. Они формируются при смене климатических режимов, изменениях крупномасштабной атмосферной и океанической циркуляции, зависят от удаленных воздействий и локальных физико-географических условий. Эти процессы привели к существенной перестройке полей ТПО и теплосодержания различных слоев в толще вод океана, формированию крупномасштабных аномалий и по-разному выражаются как на обеих фазах межгодовой изменчивости, так и в отдельных участках акватории исследуемого района.

В целом по региону в обе фазы климатических изменений (1982–2000 и 2000–2021 гг.) наблюдались положительные статистически значимые тренды среднегодовой ТПО, величина которых в первой фазе была в 1,3–1,5 раза выше, чем во второй. В течение первой фазы максимальная скорость потепления поверхности океана наблюдалась в теплый сезон в отдельных районах западной части Берингова моря, у восточного побережья Камчатки и Курильских о-вов и в юго-западной части акватории, в холодный сезон – главным образом в ее южном секторе, к востоку от побережья о. Хонсю. В течение теплого сезона второй фазы площадь области с положительными трендами ТПО значительно сократилась и локализовалась в северо-западной части исследуемой акватории.

В отличие от трендов ТПО положительные статистически значимые тренды температуры воды различных слоев нижележащей толщи вод 5–1000 м прослеживаются на большей части исследуемой акватории, что указывает на совпадение с современными тенденциями в других регионах. Восточнее  $155^\circ$  с. ш. в этом диапазоне глубин наблюдается потепление всей толщи. Здесь тренды температуры положительны в оба сезона, а в верхнем и промежуточном слоях их величины достигают максимальных значений  $0,4$ – $0,6^\circ\text{C}/10$  лет, что отразилось в возрастании теплосодержания этих слоев в северо-восточном районе исследуемой акватории на 18–20%, в юго-восточном районе – на 5–8%.

В других районах наблюдаются небольшие отрицательные тренды  $T_w$  в приповерхностном слое и выхолаживание промежуточного и глубинного слоев.

Вариации главных мод ЭОФ аномалий геопотенциала ( $\Delta H_{500}$ ) в северной части Тихого океана тесно связаны с колебаниями ТПО, поля ветра и различных климатических индексов. В целом по региону в течение второго периода (2000–2021 гг.) усилилось влияние на ТПО таких показателей характеристик барического поля и состояния океана, как аномалии геопотенциала  $\Delta H_{500}$ ,  $NP$ ,  $WP$ ,  $NPGO$ . В этот период соответствующие корреляционные связи вариаций теплосодержания верхнего слоя проявляются со следующими КИ:  $NPGO$ ,  $PDO$ ,  $WP$ ,  $PTW$ , а также с наиболее энергонесущими модами ЭОФ  $\Delta H_{500}$ . В промежуточном слое они затухают и сохраняются только для  $WP$  и ЭОФ  $\Delta H_{500}$ . В районе исследований статистически значимые связи  $SOI$  как с колебаниями теплосодержания, так и с ТПО не выражены.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson G. C., Lyman J. M. Warming trends increasingly dominate global ocean // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 757–761. doi:10.1038/s41558-020-0822-0
2. 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. doi:10.1175/JCLI-D-17-0506.1
3. On the Pacific Ocean regime shift / C. Stephens [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 28, iss. 19. P. 3721–3724. doi:10.1029/2000GL012813
4. 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
5. Externally Forced and Internally Generated Decadal Climate Variability Associated with the Interdecadal Pacific Oscillation / G. A. Meehl [et al.] // *Journal of Climate*. 2013. Vol. 26, iss. 18. P. 7298–7310. doi:10.1175/jcli-d-12-00548.1
6. Changes in Earth's Energy Budget during and after the «Pause» in Global Warming: An Observational Perspective / N. G. Loeb [et al.] // *Climate*. 2018. Vol. 6, iss. 3. 62. doi:10.3390/cli6030062
7. Nieves V., Willis J. K., Patzert W. C. Recent hiatus caused by decadal shift in Indo-Pacific heating // *Science*. 2015. Vol. 349, iss. 6247. P. 532–535. doi:10.1126/science.aaa4521
8. Истоки Ойясио / Ред. В. Р. Фукс, А. Н. Мичурин. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1997. 248 с.
9. Favorite F., Dodimead A. J., Nasu K. Oceanography of the Subarctic Pacific Region, 1960–71 // *International North Pacific Fisheries Commission*. Vancouver, Canada. Bulletin Number 33. Japan, Tokyo : Kenkyusha Printing Company, 1976. 187 p. URL: <https://npafc.org/wp-content/uploads/Bulletin-33.pdf> (date of access 9.06.2022).
10. Interdecadal variability of the Western Subarctic Gyre in the North Pacific Ocean / H. Kuroda [et al.] // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021. Vol. 169. 103461. doi:10.1016/j.dsr.2020.103461
11. Yasuda I. Hydrographic Structure and Variability in the Kuroshio-Oyashio Transition Area // *Journal of Oceanography*. 2003. Vol. 59. P. 389–402. doi:10.1023/A:1025580313836
12. Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И. Межгодовая изменчивость термических условий энергоактивной зоны Курошио и сопредельных районов Филиппинского моря // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 4. С. 59–78.

13. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change / E. Di Lorenzo [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, iss. 8. L08607. doi:10.1029/2007GL032838
14. 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. XXIII. С. 92–108.
15. *Belkin I., Krishfield R., Honjo S.* Decadal variability of the North Pacific Polar Front: Subsurface warming versus surface cooling // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29, iss. 9. P. 65-1–65-4. doi:10.1029/2001GL013806
16. *Qiu B.* Large-Scale Variability in the Midlatitude Subtropical and Subpolar North Pacific Ocean: Observations and Causes // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32, iss. 1. P. 353–375. doi:10.1175/1520-0485(2002)032<0353:LSVITM>2.0.CO;2
17. *Бышев В. И., Фигуркин А. Л., Анисимов И. М.* Современные климатические изменения термохалинной структуры вод СЗТО // *Известия ТИНРО*. 2016. Т. 185. С. 215–227. EDN WCAHXF.
18. *Ростов И. Д., Дмитриева Е. В.* Региональные особенности межгодовых изменений температуры воды в субарктической зоне Тихого океана // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 2. С. 67–79.
19. Некоторые особенности океанологических условий осеннего цветения микроводорослей у юго-восточного побережья Камчатки / М. К. Пичугин [и др.] // *Подводные исследования и робототехника*. 2020. № 4 (34). С. 70–73. doi:10.37102/24094609.2020.34.4.010
20. World Ocean Database 2018 / Т. Р. Boyer [et al.] // NOAA Atlas NESDIS 87 / Techn. ed. A. V. Mishonov. 2018. 207 p. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (date of access 9.06.2022).
21. Hybrid Global Ocean Data Assimilation System at NCEP / S. G. Penny [et al.] // *Monthly Weather Review*. 2015. Vol. 143, iss. 11. P. 4660–4677. doi:10.1175/MWR-D-14-00376.1
22. Budgets for Decadal Variability in Pacific Ocean Heat Content / Z. Hu [et al.] // *Journal of Climate*. 2020. Vol. 33, iss. 17. P. 7633–7678. doi:10.1175/JCLI-D-19-0360.1
23. Decadal variability of the upper ocean heat content in the East/Japan Sea and its possible relationship to northwestern Pacific variability / H. Na [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2012. Vol. 117, iss. C2. C02017. doi:10.1029/2011JC007369
24. 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
25. North Pacific Gyre Oscillation Synchronizes Climate Fluctuations in the Eastern and Western Boundary Systems / L. I. Ceballos [et al.] // *Journal of Climate*. 2009. Vol. 22, iss. 19. P. 5163–5174. doi:10.1175/2009JCLI2848.1
26. *Hasegawa T., Yasuda T., Hanawa K.* Multidecadal Variability of the Upper Ocean Heat Content Anomaly Field in the North Pacific and its Relationship to the Aleutian Low and the Kuroshio Transport // *Papers in Meteorology and Geophysics*. 2007. Vol. 58. P. 155–166. doi:10.2467/mripapers.58.155
27. *Wang Y-L., Wu Ch.-R.* Enhanced Warming and Intensification of the Kuroshio Extension, 1999–2013 // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, iss. 1. 101. doi:10.3390/rs11010101
28. Interannual-to-Decadal Variability in the Oyashio and its Influence on Temperature in the Subarctic Frontal Zone: An Eddy-Resolving OGCM Simulation / M. Nonaka [et al.] // *Journal of Climate*. 2008. Vol. 21, iss. 23. P. 6283–6303. doi:10.1175/2008JCLI2294.1
29. Projected increase in El Niño-driven tropical cyclone frequency in the Pacific / S. S. Chand [et al.] // *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7. P. 123–127. doi:10.1038/nclimate3181

30. *Kumar A., Wen C.* An Oceanic Heat Content–Based Definition for the Pacific Decadal Oscillation // *Monthly Weather Review*. 2016. Vol. 144, iss. 10. P. 3977–3984. doi:10.1175/mwr-d-16-0080.1
31. The Pacific Decadal Oscillation, Revisited / M. Newman [et al.] // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29, iss. 12. P. 4399–4427. doi:10.1175/jcli-d-15-0508.1
32. *Geng T., Yang Y., Wu L.* On the Mechanisms of Pacific Decadal Oscillation Modulation in a Warming Climate // *Journal of Climate*. 2019. Vol. 32, iss. 5. P. 1443–1459. doi:10.1175/jcli-d-18-0337.1

*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

**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

**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