

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.583.1: 551.46.06 (269)

DOI: 10.22449/0233-7584-2021-6-659-679

## Межгодовая изменчивость термических условий во внетропической зоне южной 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 28.04.2021 г., после доработки – 01.06.2021 г.

**Цель.** Выявить пространственно-временные особенности межгодовых изменений приземной температуры воздуха  $T_a$ , температуры поверхности океана (ТПО) и температуры воды  $T_w$  верхнего 1000-метрового слоя во внетропической зоне южной части Тихого океана за последние четыре десятилетия, проявляющиеся в результате планетарных изменений и сдвига климатического режима на рубеже XX–XXI вв.; оценить их тенденции и возможные причинно-следственные связи с процессами в атмосфере и на поверхности океана – цель настоящей работы.

**Методы и результаты.** По данным глобальной метеорологической сети и реанализа (NOAA) определены региональные особенности и тренды межгодовых колебаний температуры воды и воздуха и их связи с вариациями полей давления, ветра, выраженности центров действия атмосферы (ЦДА) и климатических индексов (КИ) за последние четыре десятилетия. Использовались методы кластерного, корреляционного, регрессионного анализа и эмпирических ортогональных функций (ЭОФ). Положительные тренды изменений полей  $T_a$  и ТПО выражены главным образом в северо-западной части региона, где они статистически значимы и достигают максимума 0,4–0,6°C/10 лет в районе Тасманова моря и к северо-востоку от о. Новая Зеландия. Области с минимальными и отрицательными или незначимыми величинами трендов температуры воздуха и воды располагаются на южной и восточной периферии исследуемого региона – в области влияния холодных течений. Во всей исследуемой акватории тренды среднегодовой ТПО и  $T_a$  составили ~ 0,04–0,06°C/10 лет, что в 2–3 раза меньше, чем в субарктическом районе северной части Тихого океана. Особенности пространственно-временной изменчивости трендов температуры воды на различных горизонтах существенно отличаются от характеристик трендов ТПО. Трансформация пространственного распределения трендов происходит уже в пределах верхнего 200-метрового слоя, а глубже максимальные значения этой величины наблюдаются в юго-восточной части акватории.

**Выводы.** Полученные результаты позволили охарактеризовать степень неоднородности реакции приземного слоя атмосферы, ТПО и вертикального распределения  $T_w$  внетропической зоны южной части Тихого океана на происходящие глобальные изменения, выделить обособленные области, дать количественные оценки скорости потепления в этих акваториях и сопоставить их с оценками для других районов Тихого океана. Отдельные фазы чередования теплых и холодных периодов в межгодовом ходе температур согласуются с изменениями региональных КИ, состояния ЦДА, что подчеркивает неоднородный характер этого процесса в пространстве и времени.

**Ключевые слова:** южная часть Тихого океана, внетропическая зона, современные климатические изменения, региональные особенности, температура воды и воздуха, тренды потепления и похолодания, климатические параметры, корреляционные связи

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН по теме № 0211-2021-0008, регистрационный № 121021700346-7. Авторы благодарят разработчиков за возможность использовать климатические данные, размещенные на сайтах NOAA.

© Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И., 2021

Для цитирования: Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И. Межгодовая изменчивость термических условий во внетропической зоне южной части Тихого океана на рубеже XX–XXI веков // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 659–679. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-659-679

## Interannual Variability of Thermal Conditions in the Extratropical Zone of the South Pacific 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

**Purpose.** The aim of the study consists in identifying the spatial-temporal features of interannual changes in the surface air temperature  $T_a$ , the sea surface temperature (SST) and the upper 1000-meter water layer temperature  $T_w$  in the extratropical zone of the South Pacific Ocean over the past four decades, which are manifested as a result of the planetary changes and a shift in the climatic regime at the turn of the XX–XXI centuries. Besides, the revealed features' trends and their possible cause-and-effect relationships with the processes in the atmosphere and on the ocean surface are planned to be assessed. **Methods and Results.** Based on the Global Meteorological Network and Reanalysis data (NOAA), regional features and trends of the water and air temperature interannual fluctuations, and their relation to variations in the pressure and wind fields, intensity of the atmosphere action centers (AAC) and climatic indices (CI) over the past 4 decades have been determined. Applied were the methods of the cluster, correlation and regression analysis, as well as the apparatus of empirical orthogonal functions (EOF). The positive trends in changes of the  $T_a$  and SST fields are manifested mainly in the northwestern part of the region, where they are statistically significant and reach their maximum 0.4–0.6°C over 10 years in the Tasman Sea region and to the northeast of New Zealand. The water areas with minimal, negative or insignificant values of the air and water temperature trends are located on the southern and eastern peripheries of the water area under study – in the areas of influence of cold currents. Over the entire investigated water area, the trends in the mean annual SST and  $T_a$  were ~ 0.04–0.06°C/10 years that are 2–3 times less than those in the subarctic region of the North Pacific Ocean. The features of spatial-temporal variability of the water temperature trends at different horizons differ significantly from the characteristics of the SST trends. The trends' spatial distribution is already transformed within the upper 200-m layer; and deeper, maximums of this value are observed in the southeastern part of the water area.

**Conclusions.** The results obtained made it possible to characterize the degree of heterogeneity of response of the atmosphere surface layer, SST and vertical distribution of  $T_w$  in the extratropical zone of the South Pacific to the ongoing global changes, to identify the isolated areas, to estimate quantitatively the warming rate in these water areas, and to compare these estimates with those of the other regions in the Pacific Ocean. It is shown that the individual phases of alternation of the warm and cold periods in the interannual temperature variation are consistent with the changes of the regional CI and the AAC state; this fact emphasizes the inhomogeneous nature of these processes in space and time.

**Keywords:** South Pacific, extratropical zone, current climatic changes, regional features, water and air temperature, warming and cooling trends, climatic parameters, correlations

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state task of POI FEB RAS on theme No. 0211-2021-0008, state registration number is 121021700346-7. The authors are thankful to the program developers for the opportunity to use the climatic data posted on the NOAA sites.

**For citation:** Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V. and Rudykh, N.I., 2021. Interannual Variability of Thermal Conditions in the Extratropical Zone of the South Pacific at the Turn of the XX–XXI Centuries. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(6), pp. 612-631. doi:10.22449/1573-160X-2021-6-612-631

## Введение

В условиях возрастающей эмиссии парниковых газов в атмосферу процесс глобального потепления продолжается. Он отличается существенной пространственно-временной неоднородностью и сопровождается перестройкой характера атмосферных процессов. Это приводит к перераспределению избыточной энергии парникового эффекта между атмосферой и океаном и формированию обширных областей аномалий климатических параметров и усилению воздействия экстремальных погодных явлений [1]. Этот процесс негативно отражается как на инфраструктуре и экологическом состоянии различных регионов, так и на деятельности ряда сфер в экономике. Мировой океан поглощает значительную часть избыточного тепла из атмосферы, и ему принадлежит важная роль в процессах демпфирования динамики этих негативных процессов. За последние 50 лет океаны поглотили около 90% антропогенного тепла, поступающего в климатическую систему. Остальное тепло идет на таяние морского льда и ледников, а также на нагревание поверхности суши и атмосферы [2].

Согласно обзору [3], в 2019 г. глобальная средняя температура поверхности океана (ТПО) была на 0,38–0,40°C выше средней за базовый период 1981–2010 гг., и этот год стал одним из трех наиболее теплых лет за всю историю наблюдений. За 20 лет с начала текущего столетия линейный тренд среднегодовой ТПО по различным климатическим массивам оценивался величиной 0,14–0,17°C/10 лет. При этом наибольшая величина тренда (0,29°C/10 лет) была отмечена в северной части Тихого океана (30–60° с. ш.), а наименьшая (0,13°C/10 лет) – в Южном океане (30–60° ю. ш.) [3].

Поглощение тепла и рост температуры на поверхности океана сопровождается его перераспределением по горизонтали и вертикали и увеличением теплосодержания вод Мирового океана в слое до 2000 м и ниже, до наивысших значений в 2019–2020 гг. за последние десятилетия [1, 4]. Причем ~ 30% потепления происходит на глубине ниже 700 м [2]. Количественные характеристики, тенденции временной изменчивости и другие особенности этого процесса различаются от района к району [5, 6] и тесно связаны с происходящими климатическими изменениями [7], включая взаимодействие между различными океаническими бассейнами [8]. Отмечается, что увеличение глобального содержания тепла в океане вызвано главным образом региональным потеплением в средних широтах Южного полушария (ЮП), где потепление проявляется на всех глубинах, а ~ 80% сосредоточено к югу от 30° ю. ш. [6, 9].

В южной части Тихого океана (ЮТО), как и в северной, сдвиг климатического режима конца 1970-х гг. [1, 5] выражен в характеристиках межгодовых колебаний крупномасштабных аномалий метеорологических и океанографических параметров, состояния центров действия атмосферы (ЦДА), показателей тепло- и энергообмена океана с атмосферой и согласуется с долгосрочной миграцией Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) [9–11]. Однако общие тенденции потепления и их региональные особенности в каждом из этих географических регионов заметно различаются.

Региональные особенности погодно-климатических условий ЮТО в значительной мере определяются взаимодействием трех основных барических об-

разований – австралийского минимума (АВМ), южнотихоокеанских максимума (ЮТМА) и минимума (ЮТМИ), являющихся перманентными или сезонными ЦДА, а также влиянием расположенных в сопредельных районах других ЦДА, таких как азиатская депрессия (АД), индоокеанский минимум (ИМ) и антарктический максимум (АМ) [12]. Связь характеристик ЦДА прослеживается не только с особенностями термических условий региона, но и с вариациями поверхностной температуры всего ЮП и ключевыми климатическими модами межгодовых и междекадных колебаний атмосферного давления и температуры [12, 13].

Структура барического поля в ЮТО представлена двумя основными формами планетарного масштаба – субантарктической депрессией, опоясывающей Антарктиду, и субтропическим поясом высокого давления. Антициклоническая область в субтропиках и циклоническая в субантарктике разделены полярным атмосферным фронтом, положение которого приблизительно соответствует субантарктическому гидрологическому фронту [13, 14]. В межгодовой изменчивости аномалий атмосферного давления ЮП присутствуют две главные моды колебаний – южная кольцевая мода (ЮКМ) и экваториально-тропическая мода (ЭТМ): Эль-Ниньо – Южное колебание (*ENSO*), характеризующиеся синхронными противофазными колебаниями между умеренными и высокими широтами [13, 15]. Южная кольцевая мода отражает зональность переноса воздушных масс в умеренных и высоких широтах как основную характеристику атмосферных процессов и проявляется во многих атмосферных переменных, включая геопотенциальную высоту, давление на уровне моря, температуру воздуха и изменчивость морского льда [16]. Показателем усиления или ослабления интенсивности зонального переноса служит индекс антарктического колебания (*AAO*), определяемый как разность между средними величинами приземного атмосферного давления на  $40^\circ$  и  $65^\circ$  ю. ш. [17].

Экваториально-тропическая мода характеризуется индексом Южного колебания (*SOI* [18]) и другими показателями событий явления Эль-Ниньо [13, 19]). Межгодовые вариации индексов *AAO*, *SOI*, поля атмосферного давления, турбулентных потоков тепла на поверхности океана и аномалий поля ТПО во внетропической зоне южной части Тихого океана взаимосвязаны. Характер этих связей меняется в зависимости от сезона как по их структуре, так и по амплитуде [15, 20–22]. В климатической системе высоких южных широт существует квазидесятилетняя изменчивость, особенно в режиме ЮКМ, в активности ЭТМ, междекадного тихоокеанского колебания (*IPO*), как и в колебаниях ТПО [23, 24]. В течение последних нескольких десятилетий *AAO* демонстрирует тенденцию к росту [11] с увеличением давления на уровне моря в средних широтах. Соответствующие изменения атмосферной циркуляции включают усиление потока Восточно-Австралийского течения (ВАТ) через Тасманово море и вызывают потепление в толще вод этого моря, которое является самым значительным во всем ЮП [6, 25]. Одновременно отмечается увеличение активности тропических циклонов, распространяющихся на юго-восток от побережья Австралии, где наблюдались наибольшие величины потоков явного и скрытого тепла в атмосферу [26]. Этот регион океана является одним из основных аккумуляторов тепла в ЮТО, а условия его накопления связаны с усилением ветровой конвергенции и событиями Ла-Нинья [7].

Цель настоящей работы – выявление тенденций и пространственно-временных особенностей межгодовых изменений приземной температуры воздуха ( $T_a$ ), ТПО и температуры воды ( $T_w$ ) в верхнем 1000-метровом слое южной части Тихого океана за последние четыре десятилетия, проявляющихся в результате планетарных изменений и сдвига климатического режима на рубеже XX–XXI вв. Рассматривается внетропическая зона [20] южной части Тихого океана между  $30^\circ$  и  $60^\circ$  ю. ш. с прилегающим широтным поясом Южного океана – до  $65^\circ$  ю. ш. Южная граница этой области примерно соответствует положению границы распространения дрейфующих льдов в течение  $> 70\%$  времени года [20, 27]. В результате непрерывного совершенствования методов наблюдений и систем усвоения метеорологических, океанографических и спутниковых данных исследуемый район достаточно полно обеспечен информационными ресурсами различных климатических массивов за исследуемый период [28–30]. В то же время при использовании данных следует учитывать некоторые ограничения, касающиеся репрезентативности данных реанализов ТПО,  $T_a$ , атмосферного давления и  $T_w$  *in situ* в районах высоких широт ЮП [11, 13, 31], особенно где присутствует морской лед [32].

### Данные и методы

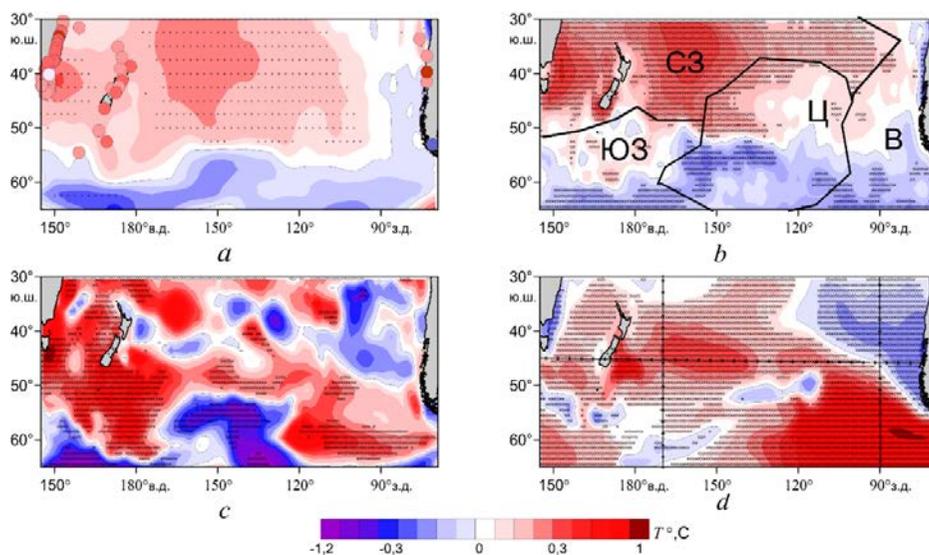
Использовались проконтролированные однородные массивы данных наблюдений температуры воздуха ( $T_{ac}$ ) на 25 метеостанциях глобальной климатической сети *GHCN-M (V3) NOAA* (<https://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/v3.php>) за период 1978–2020 гг., сеточные данные реанализа ( $T_a$  – *NCEP/NCAR Reanalysis-1*), полей давления, ветра и потоков тепла на поверхности океана, а также климатических индексов (КИ) с учетом сезонности их действия: *PDO, AMO, AAO, SOI, PTW, NP, IPO, PNA, EP/NP* [33]. Рассматриваемые КИ имеют четкую географическую привязку и определенную физическую интерпретацию (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data>). Перечисленные данные получены с сайтов *NOAA* <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>, *NOAA/NCEI/CPC* <https://www.nodc.noaa.gov/> и <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.

Для анализа межгодовых колебаний температуры воды использовались данные оптимальной интерполяции ТПО – *NOAA OI SST V2* за 1982–2020 гг. с сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/> и данные по потенциальной температуре воды на различных горизонтах ( $T_w$ ) системы усвоения океанографических данных *GODAS* (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.godas.html>) за 1980–2020 гг. Для определения соответствия сеточных данных *GODAS* характеру решаемых задач было проведено сопоставление этих данных на выборочных разрезах с данными съемок, выполненных в различные годы в южной части Тихого океана в ходе программы *WOCE* [34] (<https://cchdo.ucsd.edu/search?bbox=120,-60,-75,65>), а также с материалами постоянно пополняемой базы данных *WOD 2018* [28], доступными на сайте <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database>. В дальнейшем в работе использовались данные *GODAS* только за период 2005–2020 гг. В это время в исследуемом районе значительно увеличилась доля информации, поступающей в систему с наблюдательной сети ныряющих буев: с менее чем 6 тыс. профилей в 2000–2005 гг., распределенных крайне нерегулярно по акватории, до 280,5 тыс. профилей в 2005–2020 гг. в условиях ее полного покрытия.

Применялась единая методика статистической обработки используемых данных [33], дополненная регрессионным анализом совокупности климатических переменных. Были выделены условно теплый (ноябрь – март) и условно холодный (июнь – сентябрь) сезоны (периоды) года ЮП. 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.

95-процентный уровень значимости трендов временных рядов оценивался по критерию Стьюдента с использованием эффективных степеней свободы [29], а определение значимости коэффициентов корреляции и регрессии для рядов с различными степенями свободы – согласно работе [35].

С использованием данных по ТПО методами кластерного анализа по трем главным компонентам \* во внетропической зоне южной части Тихого океана были выделены четыре обособленных района – северо-западный (СЗ), юго-западный (ЮЗ), центральный (Ц) и восточный (В) (рис. 1, *b*). В дальнейшем путем простого осреднения сеточных данных рассчитывался многолетний ход температуры воды и воздуха в границах каждого района.



**Р и с. 1.** Тренды ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) среднегодовых величин  $T_a$  (*a*), ТПО (*b*),  $T_w$  на горизонтах 150 м (*c*) и 950 м (*d*) по данным наблюдений на метеостанциях, реанализа и *GODAS*. Показано расположение метеостанций (*a*), выделенных районов (*b*) и отдельных разрезов (*d*). Здесь и далее крестиками обозначены узлы сетки, в которых оценки статистически значимы на уровне 95%

**F i g. 1.** Values of the trends ( $^{\circ}\text{C}/10$  years) of the  $T_a$  (*a*), SST (*b*) and  $T_w$  annual average values at the levels 150 m (*c*) and 950 m (*d*) based on the observations at meteorological stations, reanalysis and *GODAS*. Locations of the meteorological stations (*a*), selected areas (*b*) and individual sections (*d*) are shown. Here and below, crosses denote the grid nodes at which the estimates are statistically significant at the 95% level

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

## Особенности пространственной и межгодовой изменчивости температуры воздуха и ТПО

В приводном слое атмосферы и на морской поверхности тенденции потепления выражены в положительных трендах изменений полей  $T_a$  и ТПО, главным образом на северо-западе региона (район СЗ), где они достигали 0,4–0,6°C/10 лет и были статистически значимы на большей части акватории (рис. 1, *a, b*). Южная граница этого района соответствует положению субтропического фронта [14]. Быстрое потепление в этих районах сопровождается накачкой и аккумуляцией тепла в верхнем слое океана, что приводит к росту теплосодержания и стерического уровня за счет теплового расширения водной толщи [7]. Аномальное для всего ЮП потепление в районе Тасманова моря может быть связано с усилением циркуляции ЮКМ, особенностями ее взаимодействия с ЭТМ и усилением ВАТ и отмечалось в прежние годы [25, 36]. Другой максимум трендов  $T_a$  и ТПО с центром в районе 35° с. ш. и 160° з. д. обусловлен усилением экваториальных пассатов над Тихим океаном и увеличением активности тропических циклонов в северо-западной части исследуемой акватории [26]. Районы с минимальными и отрицательными величинами трендов  $T_a$  и ТПО располагаются на южной и восточной периферии исследуемой акватории – в области влияния холодных вод АЦТ, Южно-Чилийского и Перуанского течений, а их минимальные значения ограничены на севере положением южной полярной и субантарктической фронтальных зон [14, 20]. Особенности пространственно-временной изменчивости трендов температуры воды на различных горизонтах (рис. 1, *c, d*) существенно отличаются от характеристик трендов ТПО и будут рассмотрены ниже. Отметим, что заметная трансформация пространственного распределения трендов происходит уже в пределах верхнего 200-метрового слоя, а глубже максимальные значения этой величины наблюдаются в юго-восточной части акватории. В этом районе поверхностные антарктические воды приполярной фронтальной области выводятся в нижележащие слои через «окно обмена» шириной 10°, расположенное к востоку от 90° з. д. [37]. В результате усиления западных ветров, повышенных потерь тепла на поверхности и субдукции антарктическая модовая и субарктическая промежуточные воды оказываются теплее, солонее и плотнее [38, 39]. С 1979 г. у побережья Антарктиды, в отличие от арктического региона, отмечается умеренное и статистически значимое увеличение площади ледяного покрова [27]. При этом данные наблюдений на отдельных метеостанциях на юге Аргентины и на побережье Антарктиды показывают отрицательные тренды  $T_a$ . В табл. 1 приведены количественные оценки тенденций происходящих изменений  $T_a$  и ТПО в среднем по районам за год и в отдельные сезоны.

На большей части акватории величины трендов  $T_a$  в холодный период года были несколько выше, чем в теплый, а трендов ТПО – наоборот. Оценки дисперсии среднегодовой температуры воздуха превышали дисперсию температуры воды. В целом за последние четыре десятилетия в районе СЗ среднегодовые температуры  $T_a$  и ТПО повысились в среднем на 0,7–0,8°C, а в других районах они почти не изменились. В этих районах отмечались наименьшие значения коэффициента корреляции колебаний межгодовых величин температуры воды и воздуха. Тренды среднегодовой  $T_a$  на метеостанциях, расположенных

на побережье Австралии, Тасмании, Новой Зеландии и Южной Америки, несколько превышали соответствующие величины на акваториях сопредельных районов (рис. 1, *a*). Для всей площади исследуемой акватории тренды среднегодовой ТПО и  $T_a$  составили  $\sim 0,04\text{--}0,06^\circ\text{C}/10$  лет, что в 2–3 раза меньше, чем для субарктического района северной части Тихого океана [40, 41].

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Межгодовые изменения аномалий температуры воздуха  
(1977–2020 гг.) и ТПО (1982–2020 гг.) в выделенных районах**  
**Interannual changes of the air temperature (1977–2020)  
and SST (1982–2020) anomalies in the identified areas**

Район / Area	Параметр / Parameter	$\sigma^2$	$b$	$tr$	$b_T$	$b_X$	$R$
СЗ / NW	$T_a$	0,13	<b>0,17</b>	0,7	<b>0,13</b>	<b>0,20</b>	<b>0,95</b>
	ТПО / SST	0,10	<b>0,20</b>	0,8	<b>0,21</b>	<b>0,19</b>	
ЮЗ / SW	$T_a$	0,17	0,01	0,1	-0,03	0,04	<b>0,75</b>
	ТПО / SST	0,04	-0,02	-0,1	-0,02	-0,02	
Ц / С	$T_a$	0,12	0,05	0,2	0,04	0,07	<b>0,84</b>
	ТПО / SST	0,08	0,01	0,0	0,05	-0,04	
В / E	$T_a$	0,00	0,0	0,0	-0,04	0,04	<b>0,83</b>
	ТПО / SST	0,01	-0,02	0,0	0,05	-0,04	
Вся акватория / Whole water area	$T_a$	0,04	<b>0,06</b>	0,3	-0,03	<b>0,09</b>	<b>0,8</b>
	ТПО / SST	0,02	<b>0,04</b>	0,2	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>	

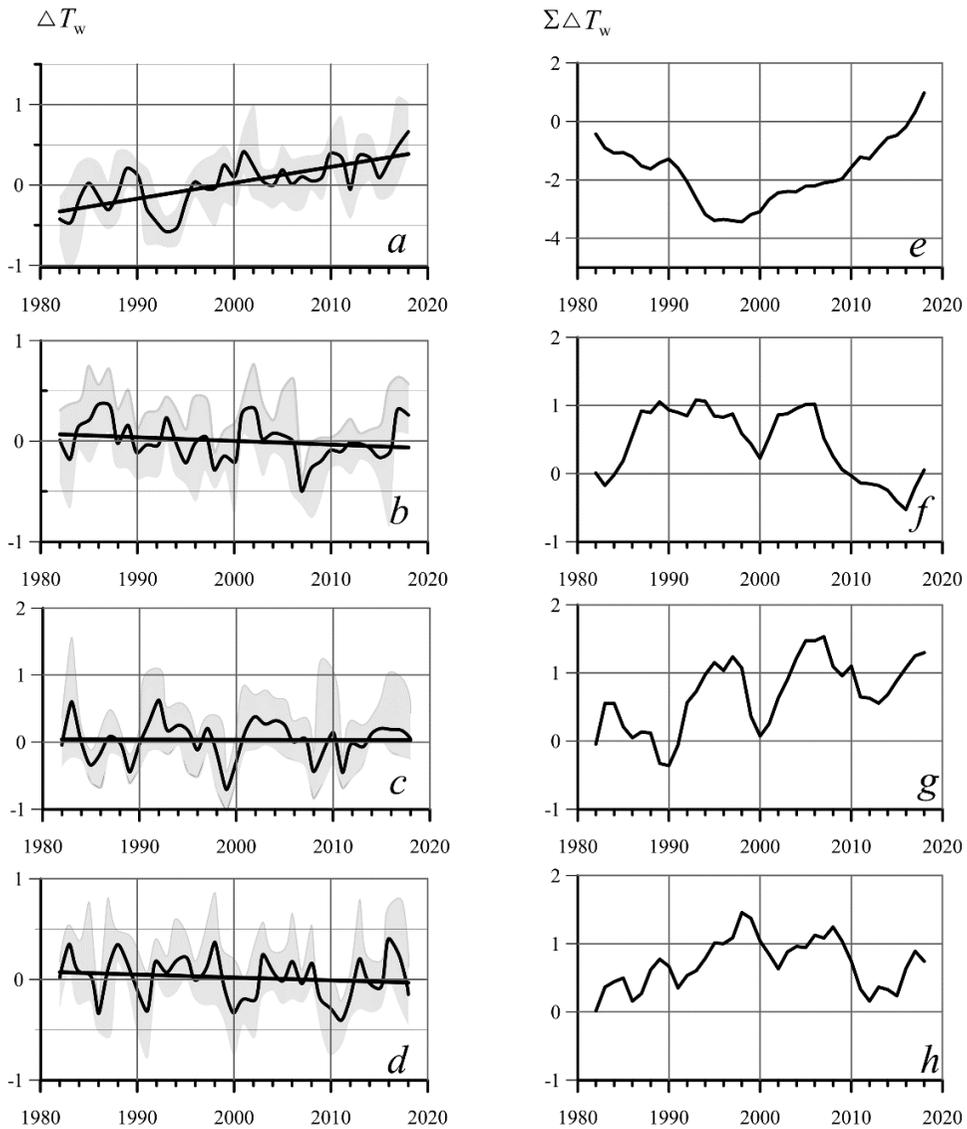
П р и м е ч а н и е.  $\sigma^2$  – дисперсия;  $b$  – коэффициент наклона линейного тренда среднегодовой температуры,  $^\circ\text{C}$  за 10 лет;  $tr$  – тренд за период наблюдений,  $^\circ\text{C}$ ;  $b_T$ ,  $b_X$  – величина  $b$  для теплого и холодного сезонов;  $R$  – коэффициент корреляции среднегодовых ТПО и  $T_a$ . Здесь и в табл. 2 полужирным шрифтом выделены статистически значимые (95%) оценки трендов и коэффициентов корреляции.

N o t e.  $\sigma^2$  is dispersion;  $b$  is the slope coefficient of the linear trend,  $^\circ\text{C}$  for 10 years;  $tr$  is the 40-year trend,  $^\circ\text{C}$ ;  $b_w$ ,  $b_c$  are the values of  $b$  for the warm and cold seasons;  $R$  is the correlation coefficient of the average annual SST and  $T_a$ . Here and in Table 2, the statistically significant (95%) estimates of the trends and correlation coefficients are highlighted in bold.

Межгодовые изменения среднегодовых аномалий ТПО,  $T_a$  и накопленных аномалий внутри каждого района идентичны, а между собой заметно различаются по амплитуде, синхронности колебаний и общим тенденциям процесса (рис. 2).

Интегральные кривые накопленных аномалий соответствуют отдельным фазам чередования теплых и холодных периодов, которые согласуются с изменениями региональных КИ и состояния ЦДА, а различия в положении отдельных экстремумов на кривых (рис. 2) подчеркивают неоднородный характер этих связей и процесса потепления в пространстве и времени. Например, временные изменения накопленных аномалий ТПО в районе СЗ (рис. 2, *e*) соответствуют временному ходу накопленных аномалий индекса  $SOI$  и давления в центре АВМ (австралийский минимум), колебания которых также тесно свя-

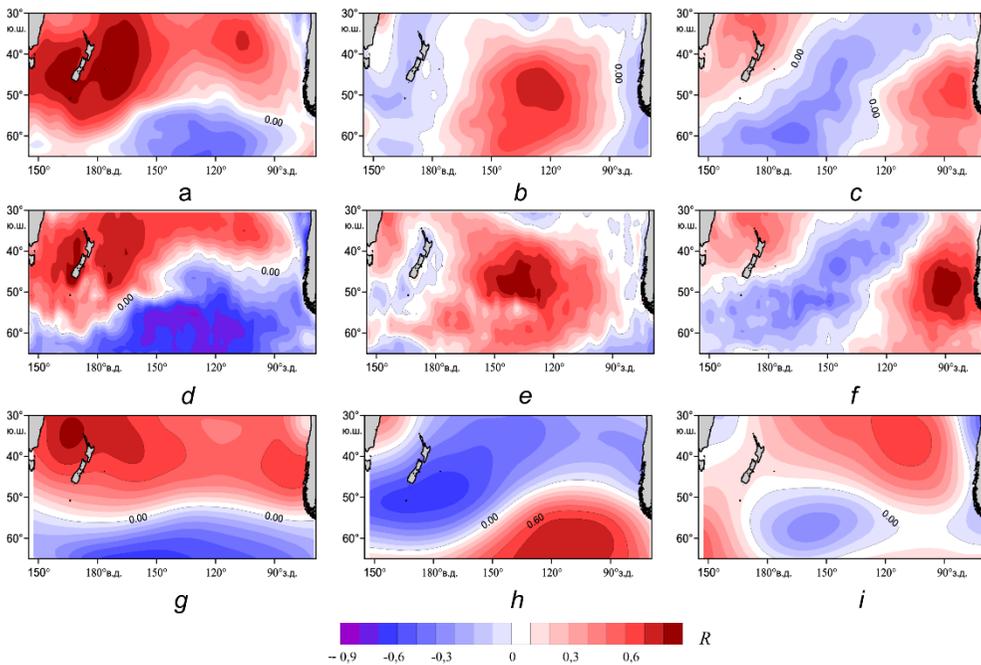
заны между собой ( $R = -0,9$ ). При этом накопление аномалий температуры разного знака в отдельных районах происходит в противофазе (рис. 2, *e, f*) – в соответствии со знаком температурного тренда. В районах Ц и В хорошо выражена квазидесятилетняя цикличность колебаний (рис. 2, *g, h*), которая обусловлена межгодовыми вариациями аномалий циркуляции в ЮП, изменениями режима ЮКМ и дальними связями с ЭТМ [21, 23, 42, 43].



**Рис. 2.** Межгодовая изменчивость аномалий среднегодовой ТПО ( $\Delta T_w$ ) и накопленных аномалий  $\Sigma \Delta T_w$  в выделенных районах: СЗ (*a, e*); ЮЗ (*b, f*); Ц (*c, g*); В (*d, h*). Показаны диапазон внутривременных колебаний, средние значения по району и линейный тренд (жирные линии)

**Fig. 2.** Interannual variability of the annual average SST anomalies ( $\Delta T_w$ ) and cumulative anomalies  $\Sigma \Delta T_w$  in the identified domains: NW (*a, e*); SW (*b, f*); C (*c, g*); E (*d, h*). The range of intra-year fluctuations, mean values over the region and linear trend (bold lines) are shown

Для получения обобщенной информации о структуре пространственно-временных изменений полей ТПО и  $T_a$  были вычислены ЭОФ межгодовых колебаний аномалий этих переменных, а также аномалий поля геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа ( $\Delta H_{500}$ ) в средней тропосфере. Аномалии поля  $\Delta H_{500}$  рассчитывались для широтного пояса 0–80° ю. ш. На рис. 3 пространственное распределение полученных ЭОФ представлено в виде полей коэффициентов корреляции между главными компонентами (ГК), или временными коэффициентами разложения полей по ЭОФ (К), и рядами этих параметров в каждой точке, что позволяет представить градации полей в единой шкале и оценить величину вклада изменчивости температуры в ГК [44]. Поля коэффициентов корреляции характеризуют противофазные колебания аномалий  $T_a$ , ТПО и  $H_{500}$ , параметризуемые различными модами ЭОФ. Главные особенности пространственно-временной изменчивости основных энергонесущих мод ( $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ ) ТПО и  $T_a$  (рис. 3, *a – c*, *d – f*) сходны между собой (коэффициент корреляции между соответствующими ГК равен 0,9).



**Рис. 3.** Поля первой, второй и третьей мод ЭОФ аномалий  $T_a$  (*a, b, c*), ТПО (*d, e, f*) и  $H_{500}$  (*g, h, i*) по среднегодовым данным

**Fig. 3.** Fields of the first, second and third EOF modes of the  $T_a$  (*a, b, c*), SST (*d, e, f*) and  $H_{500}$  (*g, h, i*) anomalies based on the annual average data

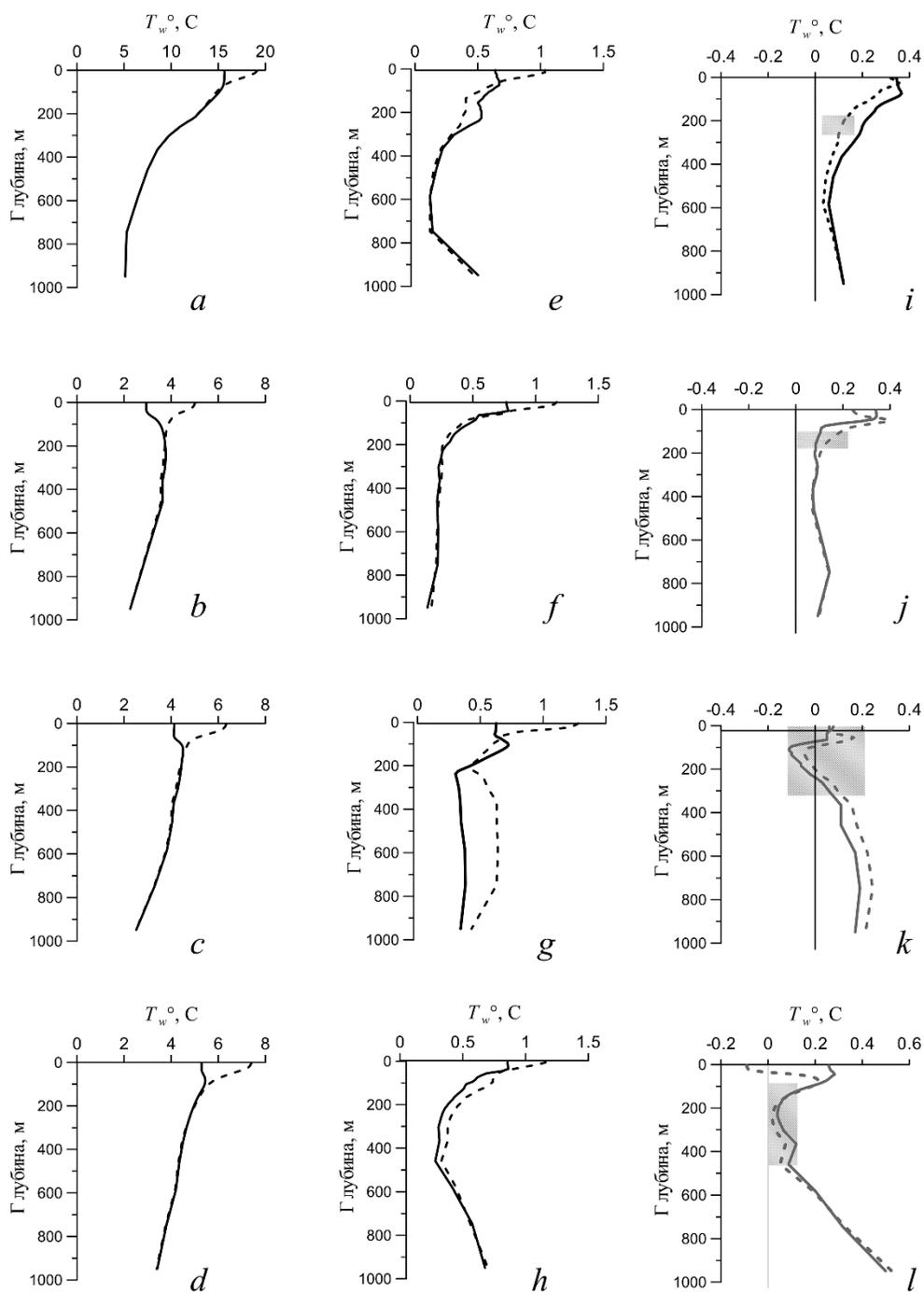
Первые три моды ЭОФ аномалий  $T_a$  и ТПО описывают ~ 60% вклада колебаний этих величин в общую дисперсию полей температуры воздуха и воды как в теплый, так и в холодный сезоны, а соответствующие моды ЭОФ  $\Delta H_{500}$  описывают ~ 70% изменчивости поля геопотенциала. Первая мода колебаний геопотенциала (36%) отражает доминирующий кольцевой режим внутритропической изменчивости поля давления, а также течений, ТПО и зональных ветров

в Южном полушарии [16] и связана с состоянием основных ЦДА (данные не приводятся). Положение максимумов коэффициентов разложения второй и третьей мод (рис. 3, *h, i*) примерно соответствует расположению южнотихоокеанских максимума и минимума [12]. Основные черты пространственного распределения коэффициентов разложения первых мод  $C_1$  ЭОФ аномалий  $T_a$ , ТПО и  $\Delta H_{500}$  (рис. 3, *a, d, g*) согласуются с распределением величин трендов этих климатических переменных (рис. 1, *a, b*), а величины вклада тренда ТПО и первой моды  $C_1$  ЭОФ ТПО в суммарную дисперсию температуры воды по району близки ( $\sim 30\%$ ).

### **Изменчивость температуры подповерхностного и промежуточного слоев**

Устойчивый энергетический дисбаланс в верхних слоях атмосферы, определенный по данным спутниковых измерений, указывает на то, что климатическая система Земли продолжает накапливать «избыточное тепло» [1, 7]. Его поступление и накопление в океане в ходе глобального потепления приводит к формированию обширных областей температурных аномалий на его поверхности и сопровождается процессами перераспределения тепла в атмосфере и толще вод за счет вертикального перемешивания и горизонтальной адвекции. Изменения теплосодержания верхнего слоя океана можно объяснить главным образом либо изменениями тепловых потоков воздух – море, либо горизонтальной адвекцией тепла в океане [9]. Важной особенностью стратификации вод в области южнотихоокеанского субтропического круговорота, граничащего на юге с АЦТ [7], которая, в сочетании с сильными ветрами, способствует передаче избыточного тепла от поверхности в глубины океана за счет процессов изопикнического обмена, является наклон изопикнических поверхностей. Изопикны  $26,5\text{--}27\text{кг/м}^3$ , которые выходят на поверхность в районе  $50\text{--}60^\circ$  ю. ш. в полосе южной и субарктической фронтальных зон, могут опускаться на глубины  $> 600$  м на  $40^\circ$  ю. ш., обеспечивая своеобразный канал для меридионального переноса тепла и других индикаторов с поверхности в промежуточные слои океана [9, 45]. Ранее отмечалось [7], что в период 2005–2014 гг. в центральной части исследуемой акватории между  $30^\circ$  и  $50^\circ$  ю. ш. наблюдалось углубление изотерм, связанное с потеплением водной толщи в результате усиления конвергенции на южном полярном фронте и сопровождавшееся увеличением объема антарктических промежуточных вод с более низкой соленостью.

Путем осреднения сеточных данных *GODAS* в пределах каждого из выделенных районов рассчитывался многолетний ход температуры воды на 31 горизонте в слое 5–950 м за каждый месяц года периода 2005–2020 гг. Были построены кривые вертикального распределения  $T_w$ , диапазона ее изменчивости и тренда температуры на различных горизонтах (рис. 4). На этих глубинах располагаются поверхностная и промежуточная структурные зоны (поверхностный и промежуточный слои и водные массы с различными свойствами) [45–47], граница между которыми находится на глубине  $\sim 150\text{--}250$  м и примерно соответствует глубине деятельного слоя.



**Рис. 4.** Обобщенные кривые вертикального распределения (*a – d*), диапазона изменений (*e – h*) и тренда (*i – l*)  $T_w$  в теплый (штриховая) и холодный (сплошная) сезоны 2005–2020 гг. Сверху вниз: районы СЗ, ЮЗ, Ц, В. Заштрихованы слои с незначимым на уровне 95% трендом

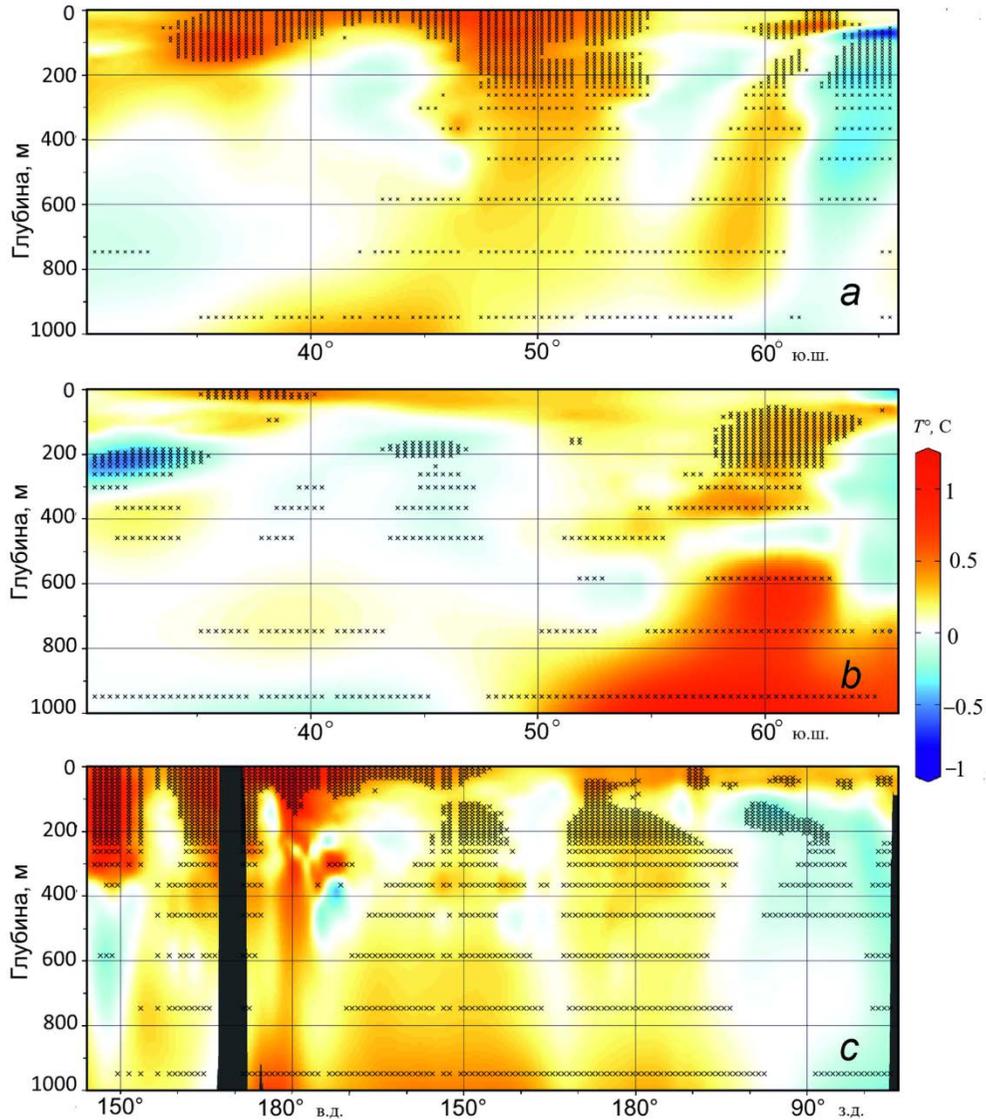
**Fig. 4.** Generalized curves of the vertical distribution (*a – d*), the range of changes (*e – h*) and the  $T_w$  trend (*i – l*) in the warm (dotted line) and cold (solid line) seasons, 2005–2020. From top to bottom: the NW, SW, C, E areas. The layers with the trend insignificant at the 95% level are shaded

Диапазон сезонных изменений среднегодовых величин  $T_w$  на приповерхностных горизонтах в районе СЗ составлял  $3,6^\circ\text{C}$  и уменьшался до  $2,1\text{--}2,2^\circ\text{C}$  в других районах (рис. 4, *a – d*), а внутри каждого из сезонов не превышал  $0,9\text{--}1,3^\circ\text{C}$ , достигая максимальных величин в теплый сезон в пределах деятельного слоя. Ниже слоя  $100\text{--}200$  м величина диапазона сезонных значений не монотонно изменяется с глубиной (рис. 4, *e – h*). В области к югу от  $59^\circ$  ю. ш. зимнее конвективное перемешивание разрушает стратификацию верхних  $400\text{--}600$  м водной толщи. Во всех районах обнаружены средние и сильные корреляционные связи между изменениями температуры в поверхностных и промежуточных водах, распространяющихся значительно ниже деятельного слоя за пределы атмосферного влияния, что согласуется с результатами инструментальных наблюдений [48] и проявляется в вертикальных профилях трендов  $T_w$  (рис. 4, *i – l*). Для всех выделенных районов знак и величина трендов температуры в отдельных слоях водной толщи в теплый и холодный сезоны изменяются синхронно и преобладающей тенденцией является потепление всей толщи вод. Полученные результаты отражают лишь общие тенденции и характеристики межгодовых изменений  $T_w$  исследуемой акватории в выбранный период времени с учетом допущения, что исследуемые поля *GODAS* соответствуют реальным условиям. В то же время они сопоставимы с подобными оценками, полученными на основе обобщения данных наблюдений на разрезах, выполненных в отдельные годы исследуемого периода [7, 9, 34, 48]. На рис. 1, *c, d* представлены карты пространственно-временной изменчивости трендов температуры воды на отдельных горизонтах, а на рис. 5 – на меридиональных разрезах вдоль  $90^\circ$  и  $170^\circ$  з. д. и зональном разрезе вдоль  $45^\circ$  ю. ш., построенные по данным *GODAS*. Расположение меридиональных разрезов (рис. 1, *d*) примерно соответствует положению южной части разрезов *P15* и *P18* *WOCE* [34]. На приведенных картах и разрезах области с положительными величинами трендов прослеживаются на различных глубинах и в различных участках водной толщи.

Полученные результаты позволили уточнить некоторые детали вертикального профиля тренда температуры, связанные с тенденциями изменений динамики вод и потоков тепла на поверхности океана, внутренними процессами, вызывающими движение и углубление изотерм, потепление или похолодание в отдельных районах. Эти процессы, причинно-следственные связи которых сложны и неоднозначны, являлись предметом целенаправленных натуральных исследований и моделирования [38, 39, 49]. Отмечается роль Южного океана и поля ветра в процессе потепления или похолодания промежуточных вод, распространяющихся в Тихом океане к северу от АЦТ, который следует понимать в контексте динамического баланса, а не просто локальных эффектов [16, 37]. Последние 30 лет происходит усиление ЮКМ и переход индекса *AAO* в область положительных значений. При этом наблюдается как усиление, так и смещение к югу пояса субполярных западных ветров Южного полушария, изменение мезомасштабной вихревой активности поля ветра, обострение термодинамического воздействия на поверхность океана и увеличение объема

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 37 № 6 2021 671

субдукции субантарктической модовой и антарктической промежуточной вод, распространяющихся к северу от субантарктического и южного полярного фронтов [11, 38, 39]. Ветровое воздействие, а также динамика льда и термодинамические эффекты ледовых процессов в области фронтальных зон оказывают значительное влияние на формирование и распространение температурных аномалий в толще вод и свойств региональных водных масс [9, 50–52].



**Р и с. 5.** Изменчивость трендов среднегодовой  $T_w$  на меридиональных (*a*, *b*) и зональном (*c*) разрезах, расположение которых показано на рис. 1, *d*  
**F i g. 5.** Variability of the trends in the mean annual  $T_w$  on the meridional (*a*, *b*) and zonal (*c*) sections, the location of which is shown in Fig. 1, *d*

### Корреляционные связи термических условий с атмосферными процессами

Был проведен взаимный корреляционный и регрессионный анализ вариаций временных рядов аномалий ТПО и  $T_w$  и изменений средних месячных аномалий поля геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа, атмосферного давления в ЦДА и климатических индексов, характеризующих состояние и динамику климатической системы в исследуемых районах.

Статистически значимые корреляционные связи между колебаниями основных мод поля давления (геопотенциала  $H_{500}$ ) в средней тропосфере с вариациями температуры воды выражены в различные сезоны года во всех районах, кроме восточного (таблица не приводится). В этом районе тренды температуры были наименьшими (табл. 1).

В рассматриваемый период в ходе межгодовых колебаний атмосферного давления в ЦДА и характеристик КИ присутствовали трендовые составляющие, связность с которыми отражает влияние различных крупномасштабных процессов на структуру полей давления, ветра и термические условия региона [33]. В исследуемом районе воздействие этих процессов проявляется через корреляционные связи региональных ЦДА (АВМ, ЮТМА, ЮТМИ, АМ, АД) и КИ обоих полушарий (ААО, PDO, PTW, SOI, NP, IPO, PNA, EP/NP) с изменчивостью ТПО и  $T_a$  в выделенных районах (табл. 2, рис. 6).

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

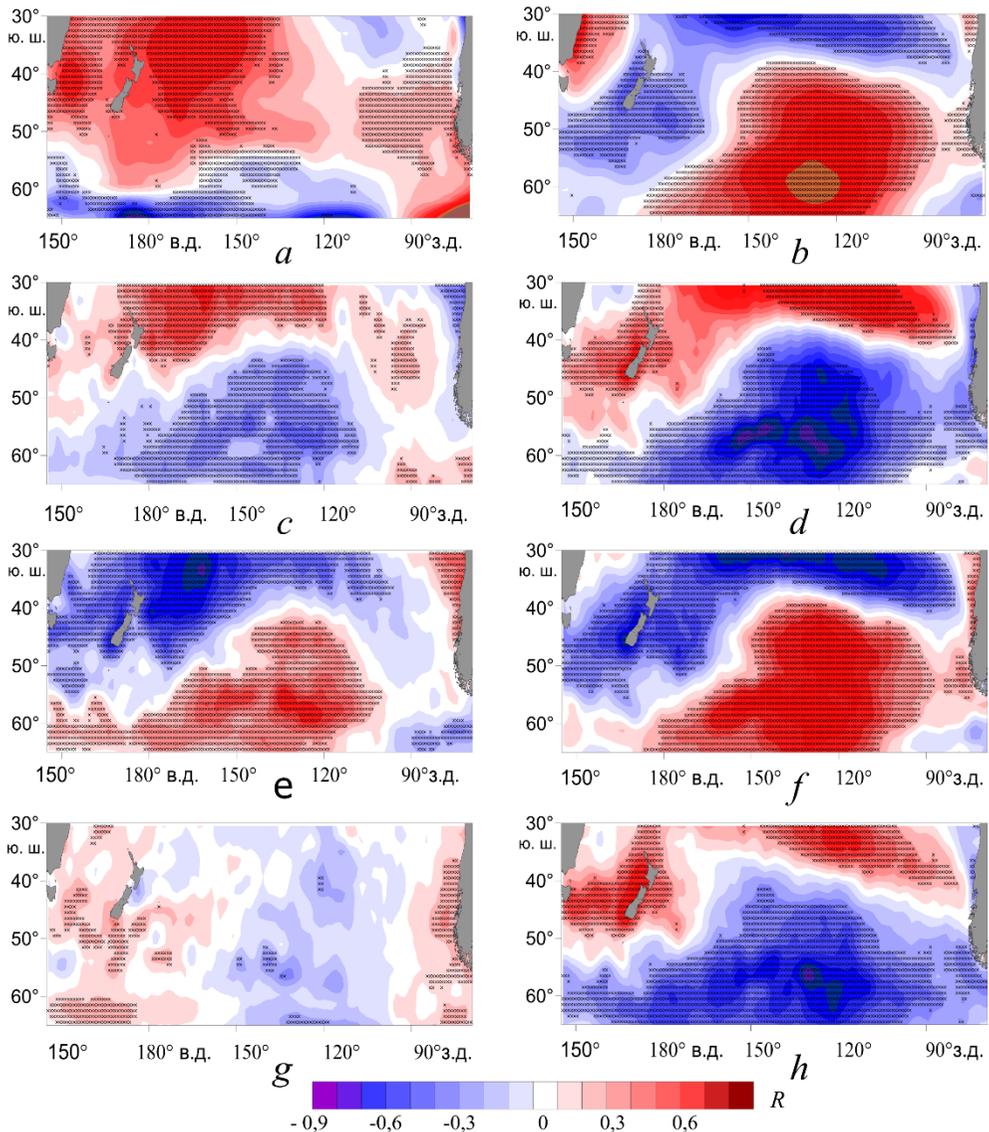
**Коэффициенты корреляции межгодовых колебаний атмосферного давления в ЦДА и климатических индексов (КИ) с вариациями ТПО в выделенных районах в теплый (т) и холодный (х) сезоны ЮП в 1982–2020 гг.**  
**Correlation coefficients of interannual fluctuations of the atmospheric pressure in the atmosphere action centers (AAC) and the climatic indices (CI) with the SST variations in the identified areas in the warm (w) and cold (c) seasons of the SH in 1982–2020**

Район / Region	ЦДА / AAC							КИ / CI				
	АВМ / AVM		ЮТМА / SPMA		ЮТМИ / SPMI		АМ / AM	АД / AD	ААО		PDO	PTW
	т / w	х / c	т / w	х / c	т / w	х / c	х / c	х / c	т / w	т / w	х / c	х / c
СЗ / NW	<b>-0,5</b>	-0,1	-0,1	-0,2	<b>-0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>-0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	-0,2	<b>-0,4</b>	<b>0,5</b>
ЮЗ / SW	0,3	0,1	<b>0,4</b>	-0,1	0,1	<b>-0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>-0,4</b>	0,3	0,1	<b>-0,4</b>	
Ц / C	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	0,0	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>-0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>-0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	
В / E	0,2	0,1	-0,1	0,0	-0,3	0,0	0,2	0,3	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	0,0	

Пространственные особенности и характер соответствующих связей выражены в поле пространственного распределения как коэффициентов корреляции, так и коэффициентов линейной регрессии колебаний различных индексов и изменчивости характеристик ТПО и  $T_a$ , отражающих зону их влияния и воздействия на термические условия региона (рис. 6).

При оценке вклада различных КИ в тенденции изменений температуры и других независимых климатических переменных необходимо учитывать их сезонность, а также тот факт, что межгодовые вариации отдельных КИ, отражающих циркуляционные и климатические изменения в атмосфере и океане,

характеризуются тесными прямыми или обратными корреляционными связями.



**Р и с. 6.** Коэффициенты линейной регрессии колебаний аномалий  $T_a$  и  $K_1$  ЭОФ  $H_{500}$  в теплый (a) и холодный (b) сезоны. То же – для регрессии ТПО с климатическими индексами:  $SOI$  (c, d),  $IPO$  (e, f),  $AAO$  (g, h)

**F i g. 6.** Linear regression coefficients of the  $T_a$  fluctuations with the  $K_1$  EOF of  $H_{500}$  geopotential anomalies in the warm (a) and cold (b) seasons. The same for the SST regression with the climatic indices:  $SOI$  (c, d),  $IPO$  (e, f) and  $AAO$  (g, h)

В западной половине исследуемой акватории в последние четыре десятилетия наблюдалось связанное с фазами различных КИ усиление восточных пассатных ветров в тропической зоне, а также западных ветров в районе 50–

65° ю. ш., прилегающем к АЦТ. По нашим оценкам, в этот период в районе 0–10° ю. ш., 160° в. д. – 160° з. д. среднегодовая скорость ветра восточных румбов увеличилась на 1,5 м/с, северных – на 0,4 м/с. При этом расходы западных пассатных течений в направлении с востока на запад увеличиваются, что способствует образованию повышенных запасов тепловой энергии в западной части экваториально-тропической зоны [53], а углубление АВМ – распространению избыточного тепла в сопредельные районы южной части Тихого океана.

На юге в районе 50–65° ю. ш., 160° в. д. – 160° з. д. среднегодовая скорость ветра западных румбов увеличилась на 1,7 м/с, северных – на 0,5 м/с. В восточной части акватории к западу от 100° з. д. в этой полосе широт также наблюдалось усиление ветров западных и северных румбов. Подобные изменения ветрового и термического режимов, а также усиление завихренности поля ветра и циркуляции вод при взаимодействии экваториально-тропической (*ENSO*) и южной кольцевой мод на фоне роста положительных значений индекса антарктического колебания (*AAO*), отрицательной фазы междекадного тихоокеанского колебания (*IPO*) и положительной фазы тихоокеанского муссона (*PTW*) отмечались в различные годы [7, 16, 21]. Они являются важным источником климатических изменений в регионе в 10-летних масштабах [43]. Согласно предварительному анализу данных, за 2005–2020 гг. выявлены статистически значимые корреляционные связи между колебаниями температуры воды в отдельных слоях толщи вод с тенденциями изменений отдельных КИ. Так, в районе СЗ в пределах верхнего слоя эти связи выражены с индексами *SOI* и *IPO* в холодный период года, с *AMO* – в теплый период; в верхнем слое в районе ЮЗ – с *PNA* в теплый период, в промежуточном слое – с интенсивностью азиатской депрессии в холодный период; в верхнем и промежуточном слоях в районе Ц – с индексами *PDO*, *SOI*, *PTW*, *AAO* в холодный период и *PNA* – в теплый период; в верхнем слое в районе В – с *PDO* в холодное время года ЮП. Вместе с тем полученные результаты требуют дальнейшего анализа и уточнения с использованием более длинных рядов наблюдений, а также при различных временных лагах корреляционных связей.

### Заключение

В южной части Тихого океана, как и в северной, сдвиг климатического режима в конце 1970-х гг. выражен в характеристиках межгодовых колебаний крупномасштабных аномалий метеорологических и океанографических параметров, состояния центров действия атмосферы, а также показателей тепло- и энергообмена океана с атмосферой. Общие тенденции потепления и их региональные особенности в отдельных районах внетропической зоны акватории региона заметно различаются. В приводном слое атмосферы и на морской поверхности тенденции потепления выражены в положительных трендах изменений полей  $T_a$  и ТПО, главным образом на северо-западе региона, где они статистически значимы и достигают максимума 0,4–0,6°C/10 лет в районе Тасманова моря и к северо-востоку от о. Новая Зеландия. Акватории с минимальными и отрицательными или незначимыми величинами трендов температуры воздуха и воды располагаются на южной и восточной периферии исследуемой акватории – в области влияния холодных течений. Для всей исследуемой акватории тренды среднегодовой ТПО и  $T_a$  составили ~0,04–0,06°C/10 лет,

что в 2–3 раза меньше, чем для субарктического района северной части Тихого океана. Отдельные фазы чередования теплых и холодных периодов в межгодовом ходе температур согласуются с изменениями региональных КИ и состояния ЦДА и подчеркивают неоднородный характер этого процесса в пространстве и времени.

Первые три моды ЭОФ аномалий  $T_a$  и ТПО описывают 60% вклада колебаний этих величин в общую дисперсию полей температуры, а соответствующие моды ЭОФ  $\Delta H_{500}$  описывают 70% изменчивости поля геопотенциала и связаны с состоянием основных региональных сезонных и перманентных ЦДА.

Особенности пространственно-временной изменчивости трендов температуры воды на различных горизонтах существенно отличаются от характеристик трендов ТПО. Трансформация пространственного распределения трендов происходит уже в пределах верхнего 200-метрового слоя, а глубже максимальные значения этой величины наблюдаются в юго-восточной части акватории. По усредненным для каждого района оценкам, максимальные положительные величины тренда  $T_w$  ( $\sim 0,3\text{--}0,4^\circ\text{C}/10$  лет) в поверхностном слое наблюдались в районах СЗ и ЮЗ и в нижней части промежуточного слоя – до  $0,5^\circ\text{C}/10$  лет в районе В, а небольшие отрицательные – в верхнем слое в районах Ц и В.

Влияние различных крупномасштабных процессов на структуру полей давления, ветра и термические условия региона проявляется через корреляционные связи региональных ЦДА и климатические индексы (*AAO*, *PDO*, *PTW*, *SOI*, *NP*, *IPO*, *PNA*, *EP/NP*) обоих полушарий. Пространственные особенности и характер соответствующих связей наглядно выражены в поле пространственного распределения как коэффициентов корреляции, так и коэффициентов линейной регрессии колебаний различных индексов и изменчивости характеристик ТПО и  $T_a$ , отражающих зону их влияния и воздействия на термические условия региона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. State of the Global Climate 2020. World Meteorological Organization. 2021. WMO-No. 1264. 54 p. URL: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10618](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618) (date of access 23.04.2021).
2. *Balmaseda M. A., Trenberth K. E., Källén E.* Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, iss. 9. P. 1754–1759. doi:10.1002/grl.50382
3. *Blunden J., Arndt D. S.* State of the climate in 2019 // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2020. Vol. 101, iss. 8. P. S1–S429. <http://doi.org/10.1175/2020BAMSStateoftheClimate.1>
4. Deep and abyssal ocean warming from 35 years of repeat hydrography / D. G. Desbruyères [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43, iss. 19. P. 10,356–10,365. doi:10.1002/2016GL070413
5. Warming of the World Ocean / S. Levitus [et al.] // *Science*. 2000. Vol. 287, iss. 5461. P. 2225–2229. doi:10.1126/science.287.5461.2225
6. *Willis J. R., Roemmich D., Cornuelle B.* Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004. Vol. 109, iss. C12. C12036. doi:10.1029/2003JC002260

7. Decade-long deep-ocean warming detected in the subtropical South Pacific / D. L. Volkov [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, iss. 2. P. 927–936. doi:10.1002/2016GL071661
8. Wang C. Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective // *Climate Dynamics*. 2019. Vol. 53. P. 5119–5136. doi:10.1007/s00382-019-04930-x
9. Gille S. T. Decadal-Scale Temperature Trends in the Southern Hemisphere Ocean // *Journal of Climate*. 2008. Vol. 21, iss. 18. P. 4749–4765. doi:10.1175/2008JCLI2131.1
10. The Southern Hemisphere Westerlies in a Warming World: Propping Open the Door to the Deep Ocean / J. L. Russell [et al.] // *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19, iss. 24. P. 6382–6390. doi:10.1175/JCLI3984.1
11. Marshall G. J. Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses // *Journal of Climate*. 2003. Vol. 16, iss. 24. P. 4134–4143. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<4134:TITSAM>2.0.CO;2
12. Мохов И. И., Чернокульский А. В., Осипов А. М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 11. С. 5–23.
13. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том I : Изменчивость факторов среды обитания. СПб. : РГГМУ, 2009. 278 с.
14. Orsi A. H., Whitworth III T., Nowlin W. D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1995. Vol. 42, iss. 5. P. 641–673. doi:10.1016/0967-0637(95)00021-W
15. Continuation of tropical Pacific Ocean temperature trend may weaken extreme El Niño and its linkage to the Southern Annular Mode / E.-P. Lim [et al.] // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. 17044. doi:10.1038/s41598-019-53371-3
16. Sen Gupta A., England M. H. Coupled Ocean-Atmosphere-Ice Response to Variations in the Southern Annular Mode // *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19, iss. 18. P. 4457–4486. doi:10.1175/JCLI3843.1
17. Gong D., Wang S. Definition of Antarctic Oscillation index // *Geophysical Research Letters*. 1999. Vol.26, iss. 4. P. 459–462. doi:10.1029/1999GL900003
18. Karoly D. J. Southern Hemisphere Circulation Features Associated with El Niño-Southern Oscillation Events // *Journal of Climate* 1989. Vol. 2, iss. 11. P. 1239–1252. doi:10.1175/1520-0442(1989)002<1239:SHCFAW>2.0.CO;2
19. Воскресенская Е. Н., Марчукова О. В. Качественная классификация событий Ла-Нинья // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 3. С. 15–26. doi:10.22449/0233-7584-2015-3-15-26
20. Herman A. Trends and variability of the atmosphere–ocean turbulent heat flux in the extratropical Southern Hemisphere. // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. 14900. doi:10.1038/srep14900
21. Yeo S.-R., Kim K.-Y. Decadal changes in the Southern Hemisphere sea surface temperature in association with El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode // *Climate Dynamics*. 2015. Vol. 45. P. 3227–3242. doi:10.1007/s00382-015-2535-z
22. Ciasto L. M., Simpkins G. R., England M. H. Teleconnections between Tropical Pacific SST Anomalies and Extratropical Southern Hemisphere Climate // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28, iss. 1. P. 56–65. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00438.1>
23. Yuan X., Yonekura E. Decadal variability in the Southern Hemisphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. Vol. 116, iss. D19. D19115. doi:10.1029/2011JD015673
24. Fogt R. L., Bromwich D. H. Decadal Variability of the ENSO Teleconnection to the High-Latitude South Pacific Governed by Coupling with the Southern Annular Mode // *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19, iss. 6. P. 979–997. doi:10.1175/JCLI3671.1
25. The response of the Southern Annular Mode, the East Australian Current, and the southern midlatitude ocean circulation to global warming / W. Cai [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32, iss. 23. P. L23706. doi:10.1029/2005GL024701

26. *Tauvale L., Tsuboki K.* Characteristics of Tropical Cyclones in the Southwest Pacific // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. 2019. Vol. 97, iss. 3. P. 711–731. doi:10.2151/jmsj.2019-042
27. *Fan T., Deser C., Schneider D. P.* Recent Antarctic sea ice trends in the context of Southern Ocean surface climate variations since 1950 // Geophysical Research Letters. 2014. Vol. 41, iss. 7. P. 2419–2426. doi:10.1002/2014GL059239
28. World Ocean Database 2018 / T. P. Boyer [et al.] // Techn. ed. A. V. Mishonov. NOAA Atlas NESDIS 87. 2018. 207 p. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (date of access 23.04.2021).
29. *Thomson R. E., Emery W. J.* Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Amsterdam : Elsevier Science, 2014. 728 p.
30. *Hosoda S, Ohira T, Nakamura T.* A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations // JAMSTEC Report of Research and Development. 2008. Vol. 8. P. 47–59. doi:10.5918/jamstecr.8.47
31. A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change / J. P. Abraham [et al.] // Reviews of Geophysics. 2013. Vol. 51, iss. 3. P. 450–483. doi:10.1002/rog.20022
32. *Garreaud R. D., Battisti D. S.* Interannual (ENSO) and Interdecadal (ENSO-like) Variability in the Southern Hemisphere Tropospheric Circulation // Journal of Climate. 1999. Vol. 12, iss. 7. P. 2113–2123. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2113:IEAIEI>2.0.CO;2
33. Климатические изменения термических условий окраинных морей западной части Тихого океана / И. Д. Ростов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 44–57.
34. *Talley L. D.* Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE). Volume 2: Pacific Ocean / Eds. M. Sparrow, P. Chapman, J. Gould. Southampton, U. K. : International WOCE Project Office, 2007. 20 p.
35. The Effective Number of Spatial Degrees of Freedom of a Time-Varying Field / C. S. Bretherton [et al.] // Journal of Climate. 1999. Vol. 12, iss. 7. P. 1990–2009. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1990:TENOSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1990:TENOSD>2.0.CO;2)
36. Remote Forcing of Tasman Sea Marine Heatwaves / Z. Li [et al.] // Journal of Climate. 2020. Vol. 33, iss. 12. P. 5337–5354. doi:10.1175/JCLI-D-19-0641.1
37. An Exchange Window for the Injection of Antarctic Intermediate Water into the South Pacific / D. Iudicone [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2007. Vol. 37, iss. 1. P. 31–49. doi:10.1175/JPO2985.1
38. On the response of subduction in the South Pacific to an intensification of westerlies and heat flux in an eddy permitting ocean model / C. Liu [et al.] // Advances in Atmospheric Sciences. 2017. Vol. 34. P. 521–531. doi:10.1007/s00376-016-6021-2
39. Impacts of wind stress on the Antarctic Circumpolar Current fronts and associated subduction / S. M. Downes [et al.] // Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 38, iss. 11. L11605. doi:10.1029/2011GL047668
40. *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.
41. *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
42. *Mo K. C.* Relationships between Low-Frequency Variability in the Southern Hemisphere and Sea Surface Temperature Anomalies // Journal of Climate. 2000. Vol. 13, iss. 20. P. 3599–3610. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3599:RBLFVI>2.0.CO;2
43. *Salinger M. J., Renwick J. A., Mullan A. B.* Interdecadal Pacific Oscillation and South Pacific climate // International Journal of Climatology. 2001. Vol. 21, iss. 14. P. 1705–1721. doi:10.1002/joc.691

44. *Попова В. В.* Современные изменения температуры приземного воздуха на севере Евразии: региональные тенденции и роль атмосферной циркуляции // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2009. № 6. С. 59–69.
45. *Кукса В. И.* Атлас промежуточных и подповерхностных промежуточных вод Мирового океана. М. : Гидрометеиздат, 1978. 83 с.
46. *Степанов В. Н.* Океаносфера. М. : Мысль, 1983. 270 с.
47. *Кошляков М. Н., Тараканов Р. Ю.* Промежуточные воды южной части Тихого океана // Океанология. 2005. Т. 45, № 4. С. 485–503.
48. *Sokolov S., Rintoul S. R.* Subsurface structure of interannual temperature anomalies in the Australian sector of the Southern Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2003. Vol. 108, iss. C9. 3285. doi:10.1029/2002JC001494
49. *Iudicone D., Madec G., McDougall T. J.* Water-Mass Transformations in a Neutral Density Framework and the Key Role of Light Penetration // Journal of Physical Oceanography. 2008. Vol. 38, iss. 7. P. 1357–1376. doi:10.1175/2007JPO3464.1
50. Mooring Observations of Air-Sea Heat Fluxes in Two Subantarctic Mode Water Formation Regions / V. Tamsitt [et al.] // Journal of Climate. 2020. Vol. 33, iss. 7. P. 2757–2777. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0653.1>
51. The Effects of Enhanced Sea Ice Export from the Ross Sea on Recent Cooling and Freshening of the Southeast Pacific / I. Cerovečki [et al.] // Journal of Climate. 2019. Vol. 32, iss. 7. P. 2013–2035. doi:10.1175/jcli-d-18-0205.1
52. *Haumann F. A., Gruber N., Münnich M.* Sea-Ice Induced Southern Ocean Subsurface Warming and Surface Cooling in a Warming Climate // AGU Advances. 2020. Vol. 1, iss. 2. e2019AV000132. doi:10.1029/2019AV000132
53. Decadal Western Pacific Warm Pool Variability: A Centroid and Heat Content Study / A. Kidwell [et al.] // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. 13141. doi:10.1038/s41598-017-13351-x

*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)