


Тенденции и региональные особенности изменчивости термических условий северо-восточной части Тихого океана севернее 30° с. ш. в последние четыре десятилетия

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 10.11.2022; одобрена после рецензирования 08.12.2022;
принята к публикации 26.04.2023.

Аннотация

Цель. Выявить региональные особенности современных климатических изменений температуры воды в северо-восточной части внетропической зоны Тихого океана, оценить характеристики температурных трендов на поверхности и в верхнем слое океана и их связи с крупномасштабными процессами в океане и атмосфере – цель настоящей работы.

Методы и результаты. На основе климатических массивов NOAA с использованием статистических методов анализа и аппарата эмпирических ортогональных функций определены характеристики межгодовой изменчивости температуры воды на поверхности и в верхнем 1000-метровом слое различных районов исследуемой акватории. Дана количественная оценка температурных трендов, корреляционных связей с влияющими факторами и их статистической значимости для отдельных 20-летних периодов последних 40 лет.

Выводы. В первые десятилетия XXI в. тренды потепления явно выражены на поверхности и в верхнем 200-метровом слое северо-восточного и центрального районов акватории. По сравнению с предшествующим 20-летним периодом величина положительных трендов ТПО в среднем по всей акватории увеличилась примерно в 4 раза. За последние два десятилетия теплосодержание верхнего 200-метрового слоя увеличилось на 5%, а всего 1000-метрового – на 2%, что в 1,5 раза меньше, чем в северо-западном секторе внетропической зоны Тихого океана, где в отличие от поверхности потепление толщи вод проходило более высокими темпами. В целом по исследуемому району корреляционные связи колебаний теплосодержания верхнего 200-метрового слоя океана с изменениями влияющих факторов проявляются через климатические индексы *NPGO*, *PDO*, *NP*, *PNA*, *SOI*, *AD* и градиенты атмосферного давления между ведущими центрами действия атмосферы.

Ключевые слова: северо-восточная часть Тихого океана, внетропическая зона, современные климатические изменения, региональные особенности, температура воды, теплосодержание, тренды потепления, климатические индексы, 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. Авторы признательны рецензенту за конструктивные замечания.

Для цитирования: Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И. Тенденции и региональные особенности изменчивости термических условий северо-восточной части Тихого океана севернее 30° с. ш. в последние четыре десятилетия // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 448–466. EDN SLYDJV.

Trends and Regional Features of Variability of the Northeast Pacific Ocean Thermal Conditions North of 30° N over the Last Four Decades

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*

Abstract

Purpose. The study is purposed at revealing the regional features of modern climatic changes in water temperature in the northeastern extratropical zone of the Pacific Ocean, at assessing the characteristics of temperature trends on the ocean surface and in its upper layer and their relationship with the large-scale processes in the ocean and atmosphere.

Methods and Results. Based on the NOAA climatic data sets, and using the statistical methods of analysis and the apparatus of empirical orthogonal functions, the characteristics of the interannual variability of water temperature on the surface and in the upper 1000-meter layer were determined in different regions of the area under study. Temperature trends, correlations with the influencing factors and their statistical significance for some 20-year periods of previous 40 years were quantitatively assessed.

Conclusions. In the first decades of the 21st century, the warming trends are explicit on the surface and in the upper 200-meter layer of the northeastern and central regions of the area. As compared to the previous 20-year period, the magnitude of positive SST trends increased, on average, by about 4 times over the entire water area. In course of the past two decades, the heat content of the upper 200-meter layer increased by 5% and that of the whole 1000-meter layer – by 2%, which is 1.5 times less than in the northwestern sector of the Pacific extratropical zone where, unlike the surface, the rate of water column warming was higher. As for the area under study, on the whole, the correlations between the heat content fluctuations in the upper 200-meter ocean layer and the changes in influencing factors are manifested through the climatic indices *NPGO*, *PDO*, *NP*, *PNA*, *SOI*, *AD* and the atmospheric pressure gradients between the leading centers of the atmosphere action.

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

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment of POI FEB RAS on theme 0211-2021-0008. State registration No. 121021700346-7. The authors are thankful to the program developers for the possibility to use the climatic data posted on the NOAA sites. The authors are grateful to the reviewer for constructive comments.

For citation: Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V. and Rudykh, N.I., 2023. Trends and Regional Features of Variability of the Northeast Pacific Ocean Thermal Conditions North of 30° N over the Last Four Decades. *Physical Oceanography*, 30(4), pp. 410-427.

Введение

Исследуемый район акватории Тихого океана на севере ограничен дугой Алеутских о-вов, в восточной и северо-восточной частях – побережьем Северной Америки, на западе – меридианом 180°, на юге – 30° с. ш. Его северная часть расположена в области распространения трансформированной субарктической структуры вод, южная – субтропической, а центральная принадлежит к переходной области, в которой между 40–45° с. ш. находится зона субаркти-

ческого (северного полярного) фронта, который в заливе Аляска распространяется до 57° с. ш. [1] и постепенно размывается в направлении с запада на восток. В этой полосе наблюдается переход от теплых и соленых субтропических вод к холодным, более пресным субарктическим водам [2] и прослеживаются Субарктическое и Северо-Тихоокеанское течения, направленные на восток [3–5]. По мере продвижения к побережью Северной Америки их общий поток раздваивается. Северная ветвь образует циклонический Аляскинский круговорот, включающий Аляскинское течение, движущееся на северо-запад у побережья Аляски и далее на юго-запад вдоль Алеутских о-вов. Другая ветвь отклоняется на юго-восток, образуя поток прибрежного Калифорнийского течения в системе субтропического круговорота [3]. Под влиянием сильной стратификации сезонные изменения температуры воды (T_w) на различных горизонтах в этой области наблюдаются в основном в верхнем слое 100–250 м. На глубине 100 м фаза сезонного цикла колебаний температуры отстает от фазы на поверхности на два-три месяца [6, 7]. Как отмечалось ранее [8], погодноклиматические условия в этом районе зависят от взаимодействия трех основных барических образований, являющихся сезонными центрами действия атмосферы (ЦДА): алеутского минимума (алеутской депрессии), северотихоокеанского (гавайского) максимума и сибирского зимнего антициклона, определяющих характеристики теплообмена между океаном и атмосферой, поля давления, ветра и состояния верхнего слоя океана. Глобальное потепление оказывает влияние на распределение давления в атмосфере и отдельных ЦДА, а также на силу и расположение струйных течений над полярно-фронтальной зоной – областью резкого теплового контраста между холодным полярным и теплым тропическим воздухом. Характеристики ЦДА и струйных течений являются движущими факторами погоды в средних широтах [9].

В исследуемом районе располагается ареал обитания и нагула различных видов тихоокеанских лососей, нерестящихся в реках прибрежной зоны тихоокеанской субарктики и являющихся важнейшим объектом промысла. Современные климатические изменения, происходящие в различных геосферах, способны вызвать разрушительное воздействие на морские экосистемы и негативные экономические последствия. Так, с 2013 г., после завершения паузы в глобальном потеплении [10, 11], обычным и распространенным явлением в северо-восточной части Тихого океана стали так называемые морские волны тепла – локальные области с экстремально высокими температурами на поверхности океана (ТПО), связанные с атмосферными воздействиями [12–15]. В 2014–2016 и 2019–2020 гг. эти области с аномалиями ТПО до $2,5\text{--}3^\circ\text{C}$ распространились вдоль западного побережья Северной Америки и на большую часть северо-востока Тихого океана, формируя трехмерные термические структуры, охватывающие верхний слой океана толщиной несколько сотен метров и сохраняющиеся длительное время [12]. Во время этих событий фаза изменений T_w на горизонтах 200–300 м отставала от изменений ТПО на несколько месяцев [14, 15]. Эти явления оказали беспрецедентное биологическое воздействие на многочисленные трофические уровни морской экосистемы, количество различных таксонов зоопланктона и, как следствие, на биомассу рыбных запасов [15, 16].

Связи интенсивности, продолжительности и масштабов этого явления с характеристиками поля атмосферного давления, ветра и фазами таких крупномасштабных процессов взаимодействия атмосферы и океана, как Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), десятилетнее (*PDO*) и междесятилетнее (*IPO*) тихоокеанские колебания, сложны и неоднозначны, так как имеют множество перекрывающихся пространственных и временных масштабов [17] и являются предметом продолжающихся исследований. В них отмечается, что последние 6–7 лет стали одними из самых теплых в истории наблюдений в исследуемом районе. К этому времени пауза в глобальном потеплении завершилась, после 2016 г. произошло ослабление алеутской депрессии, а индекс интенсивности крупномасштабного северотихоокеанского циклонического круговорота (*NPGO*), отражающий тенденции колебаний ветрового режима, уровня океана и ТПО, перешел в отрицательную фазу.

В целом по району Тихоокеанской субарктики тенденции потепления за последние 4 десятилетия выражены в трендах межгодовой изменчивости температуры воздуха и ТПО (в среднем $\sim 0,20^\circ\text{C}/10$ лет) с существенными региональными различиями (в 1,5–2 раза) происходящих изменений [8, 18]. При этом на западе региона скорость потепления выше, чем на востоке, где температурные тренды за указанный период были минимальны или статистически не значимы. Вместе с тем под влиянием сдвигов климатического режима, наблюдаемых в последние десятилетия, выделяются отдельные фазы с различной скоростью потепления [19], поэтому оценки трендов температуры за эти периоды, как и интерпретация их причин, чувствительны к периоду расчета и могут отличаться от оценок для многолетнего периода [20, 21]. Так, в интервале 1998–2013 гг. темпы роста глобальной средней приземной температуры замедлились по сравнению со второй половиной XX в., что являлось предметом целенаправленных исследований [14]. С этим феноменом тесно связаны характеристики вертикальной структуры трендов температуры воды и теплосодержания, которые изучены недостаточно вследствие относительно небольшого количества данных океанографических наблюдений в этом районе. В последние годы в ходе исследований климата океана находят все более широкое применение перспективные системы (модели) усвоения (ассимиляции) океанографических данных, такие как *SODA* и *GODAS* [22]. Так, за период 2000–2021 гг. в исследуемом районе доля информации, поступающей в базы данных [23] и систему *GODAS* с наблюдательной сети ныряющих буев *ARGO*, увеличилась до 127,1 тыс. профилей (без учета Берингова моря). Далее в настоящей работе использовались данные *GODAS* по T_w именно за последний 20-летний период.

Цель исследований – выявить региональные особенности современных климатических изменений температуры воды в северо-восточной части внетропической зоны Тихого океана за отдельные 20-летние периоды, определить количественные характеристики температурных трендов на поверхности и в верхнем слое океана и оценить их связи с крупномасштабными процессами в океане и атмосфере.

Данная работа является продолжением исследований авторами особенностей межгодовой изменчивости термических характеристик воды и воздуха на акваториях тихоокеанской субарктики и северо-западной части внетропической зоны Тихого океана, которые наблюдаются в условиях современного глобального потепления [8, 18, 24].

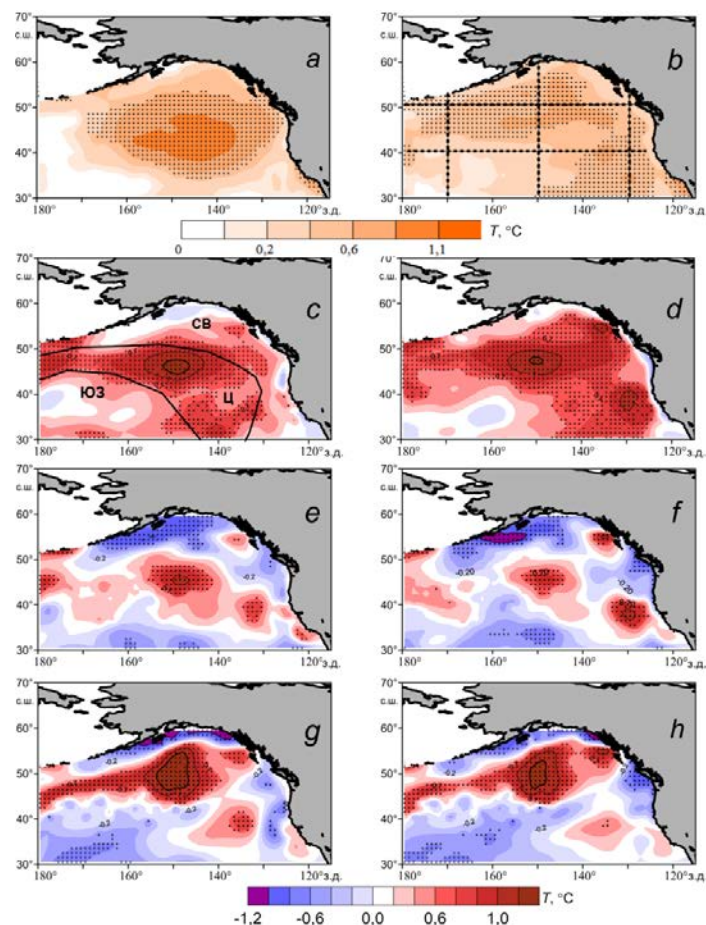
Данные и методы

Использовались следующие данные климатических массивов NOAA:

– по температуре на поверхности океана за 1982–2021 гг. (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>);

– по T_w на различных горизонтах системы усвоения океанографических данных GODAS [22] (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.godas.html>) за 2000–2021 гг.;

– данные реанализа полей давления, ветра и потоков тепла на поверхности океана и ряды климатических индексов (КИ) [24] (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/index.html>, и <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>).



Р и с. 1. Тренды аномалий ТПО ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) (*a, b*) и нормализованных величин аномалий интегральной температуры ΔQ_T (усл. ед./10 лет) в слоях 5–200 м (*c, d*), 200–460 м (*e, f*) и 460–950 м (*g, h*) в теплый (слева) и холодный (справа) сезоны 2002–2021 гг. Здесь и далее крестиками обозначены узлы сетки, в которых оценки статистически значимы на уровне 95% [8]. На фрагменте *b* показано расположение разрезов, на фрагменте *c* – выделенных по теплоту сезону районов (CB, Ц и ЮЗ)

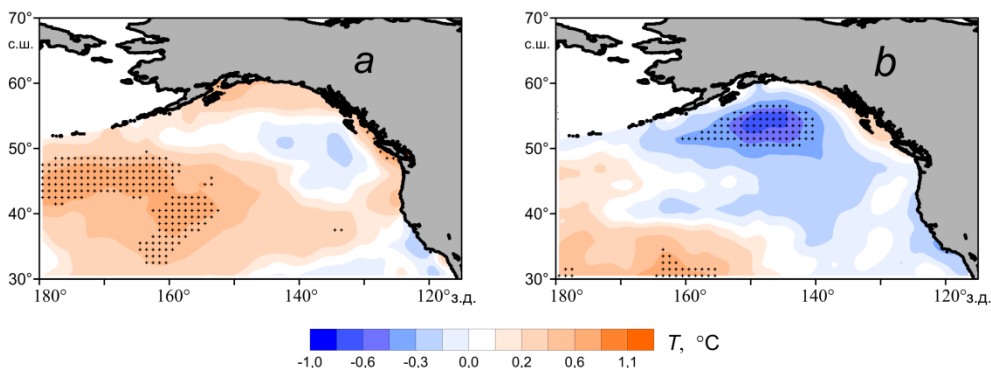
F i g. 1. Values of the SST trend ($^{\circ}\text{C}/10$ years) (*a, b*) and the normalized heat content anomalies ΔQ_T , (non-dimensional units/10 years) in the layers 5–200 m (*c, d*), 200–460 m (*e, f*) and 460–950 m (*g, h*) in the warm (left) and cold (right) seasons in 2002–2021. Here and below, crosses denote the grid nodes where the estimates are 95% statistically significant [8]. Fragment *b* shows the locations of sections, and fragment *c* – the selected warm-season areas (NE, C and SW)

Дополнительно вычислялся индекс разности атмосферного давления на уровне моря между ЦДА – гавайским максимумом и алеутским минимумом ($H-NP$). Статистический анализ и разложение полей аномалий исследуемых рядов на главные компоненты эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) проводились по единой методике [8, 24] для теплого, летнего (июнь – сентябрь) и холодного, зимнего (ноябрь – март) сезонов (периодов) года. Также были рассчитаны величины аномалий интегральной температуры (ΔQ_T) – показателя теплосодержания [25] в узлах сетки $0,3^\circ \times 1^\circ$ для различных слоев от приповерхностного до 1000 м. По данным о межгодовой изменчивости ΔQ_T в слое 5–200 м с использованием методов ЭОФ и кластерного анализа в пределах исследуемой акватории были выделены три района: северо-восточный (СВ), центральный (Ц) и юго-восточный (ЮВ) (рис. 1, с). В результате осреднения сеточных данных в пределах этих районов были сформированы ряды межгодовых колебаний аномалий T_w на различных горизонтах и интегральной температуры в отдельных слоях: верхнем (5–200 м), промежуточном (200–460 м) и глубинном (460–950 м).

Особенности пространственной и межгодовой изменчивости температуры воды

В границах северо-восточного района располагается система вод Аляскинского круговорота, а также холодных Аляскинского и Калифорнийского течений. В секторе центрального района выделяется переходная или область смешения вод двух структурных зон, а в юго-западном районе распространены преимущественно субтропические воды [3, 5] (рис. 1, с).

При сопоставлении рис. 1, а, b и 2 видно, что, несмотря на замедление темпов роста ТПО и паузы в глобальном потеплении с конца 90-х гг., современный 20-летний период начала XXI в. отличался более высокими темпами потепления, чем в конце XX в. Это подтверждается и соответствующими количественными оценками, приведенными в табл. 1.



Р и с. 2. Тренды аномалий ТПО ($^\circ\text{C}/10$ лет) за теплый (*a*) и холодный (*b*) сезоны 1982–2001 гг.
Fig. 2. Values of the SST trends ($^\circ\text{C}/10$ years) in warm (*a*) and cold (*b*) seasons in 1982–2001

Таблица 1
Table 1

Тенденции межгодовых изменений аномалий ТПО в исследуемых районах за 1982–2001 и 2002–2021 гг.
Trends in interannual changes of the SST anomalies in the identified domains for two periods: 1982–2001 and 2002–2021

Район / Area	σ^2	b	D	tr	b_w/b_w	b_c/b_c
1982–2001						
СВ / NE	0,12	0,02	0	0,0	0,13	-0,13
Ц / С	0,20	0,02	0	0,0	0,24	-0,11
ЮЗ / SW	0,20	0,30	16	0,6	0,47	0,23
Вся акватория / Whole area	0,06	0,10	5	0,2	0,28	0,00
2002–2021						
СВ / NE	0,37	0,41	20	0,8	0,41	0,48
Ц / С	0,35	0,56	39	1,1	0,73	0,53
ЮЗ / SW	0,18	0,34	15	0,7	0,35	0,30
Вся акватория / Whole area	0,17	0,44	40	0,9	0,49	0,44

Примечание. σ^2 – дисперсия среднегодовой ТПО; b – коэффициент наклона линейного тренда среднегодовой температуры ($^{\circ}\text{C}/10$ лет); D – вклад тренда в суммарную дисперсию (%); tr – тренд за период наблюдений ($^{\circ}\text{C}$); b_w , b_c – величина b для теплого и холодного сезонов. Здесь и в других таблицах полужирным шрифтом выделены статистически значимые (95%) оценки.

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

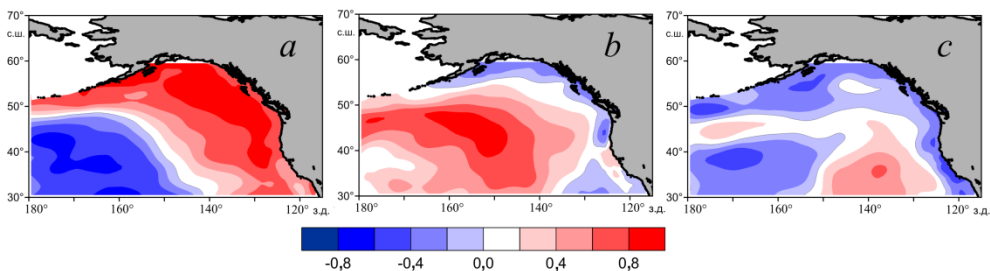
В первые десятилетия XXI в. тренды потепления верхнего 1000-метрового слоя как в теплый, так и в холодный сезон лучше всего выражены на поверхности и в верхнем 200-метровом слое северо-восточного и центрального районов (рис. 1, $a-d$). В отдельные годы этого периода (2014–2016 и 2019–2020 гг.) наблюдались экстремальные аномалии среднегодовых величин ТПО (в среднем по районам $\sim 1,3^{\circ}\text{C}$). По сравнению с этими годами в предшествующий 20-летний период (1982–2001 гг.) тренды межгодового хода ТПО были значительно ослаблены (рис. 2).

В холодный сезон периода 1982–2001 гг. наблюдалось аномальное похолодание на поверхности океана в районах СВ и Ц (табл. 1, рис. 2, b) в области циклонического Аляскинского круговорота, которое происходило одновременно с его усилением [4]. В течение второго периода на фоне возрастания дисперсии колебаний аномалий ТПО (АТПО) величина положительных трендов в среднем по всей акватории увеличилась примерно в 4 раза, т. е. рост ТПО значительно ускорился (табл. 1). В этом заключается отличие рассматриваемой акватории от района северо-западной части внетропической зоны Тихого океана [24], где наблюдалась противоположная тенденция. Как было показано

ранее [18], межгодовые колебания АТПО в этих районах находятся в противофазе. Предварительный анализ межгодовой изменчивости характеристик поля барической топографии показал, что одной из возможных причин различия скорости потепления в этих районах являются изменения положения и выраженности Алеутской депрессии [24, 26].

В нижележащих промежуточном и глубинном слоях в различных районах исследуемой акватории наблюдаются обширные участки статистически значимых трендов нормализованных аномалий интегральной температуры (ΔQ_T) с максимальной положительной величиной до 1,2 усл. ед./10 лет в области Аляскинского круговорота и отрицательными значениями до $-1,2$ усл. ед./10 лет в промежуточном и глубинном слоях вдоль кромки прибрежного шельфа (рис. 1, *e – h*). Здесь, в районах прибрежной зоны североамериканского континента, изменение характеристик ветрового режима вызывает прибрежный апвеллинг более холодных глубинных вод к поверхности, оказывающий значительное влияние на теплосодержание вод и состояние морских экосистем [3, 27]. Другая область значительных отрицательных трендов ΔQ_T прослеживается на севере района СВ в системе вод Аляскинского течения, а третья – в районе ЮЗ. Отметим, что общая площадь и объем промежуточного и глубинного слоев, в которых наблюдается потепление водной толщи исследуемого района, составляют значительно меньшую величину, чем в районе северо-западной части океана [24], где этот процесс идет более высокими темпами.

Основные черты пространственной структуры межгодовых колебаний интегральной температуры в верхнем слое 5–200 м за последние 20 лет характеризуются следующими особенностями. Первые три моды разложения на ЭОФ поля ΔQ_T как в теплый, так и в холодный сезон описывают $\sim 70\%$ его суммарной дисперсии. Первая, наиболее энергонесущая мода (37% дисперсии) отражает главную особенность – противофазные колебания интегральной температуры в районах СВ – Ц и ЮЗ, а вторая и третья (33% дисперсии) – более мелкие особенности поля трендов ΔQ_T в слое 5–200 м (рис. 1, *c*; 3).



Р и с. 3. Пространственное распределение коэффициентов первой (*a*), второй (*b*) и третьей (*c*) мод ЭОФ аномалий интегральной температуры ΔQ_T (усл. ед.) в слое 5–200 м в теплый сезон 2002–2021 гг.

F i g. 3. Spatial distribution of the coefficients of the first (*a*), second (*b*) and third (*c*) EOF modes of the integral temperature anomalies ΔQ_T (non-dimensional units) in the 5–200 m layer for the warm season in 2002–2021

В дальнейшем полученные результаты разложения поля колебаний ΔQ_T на составляющие использовались для выявления корреляционных связей изменчивости термических условий исследуемой акватории с характеристиками крупномасштабных процессов в океане и атмосфере.

Межгодовая изменчивость термических характеристик верхнего 1000-метрового слоя

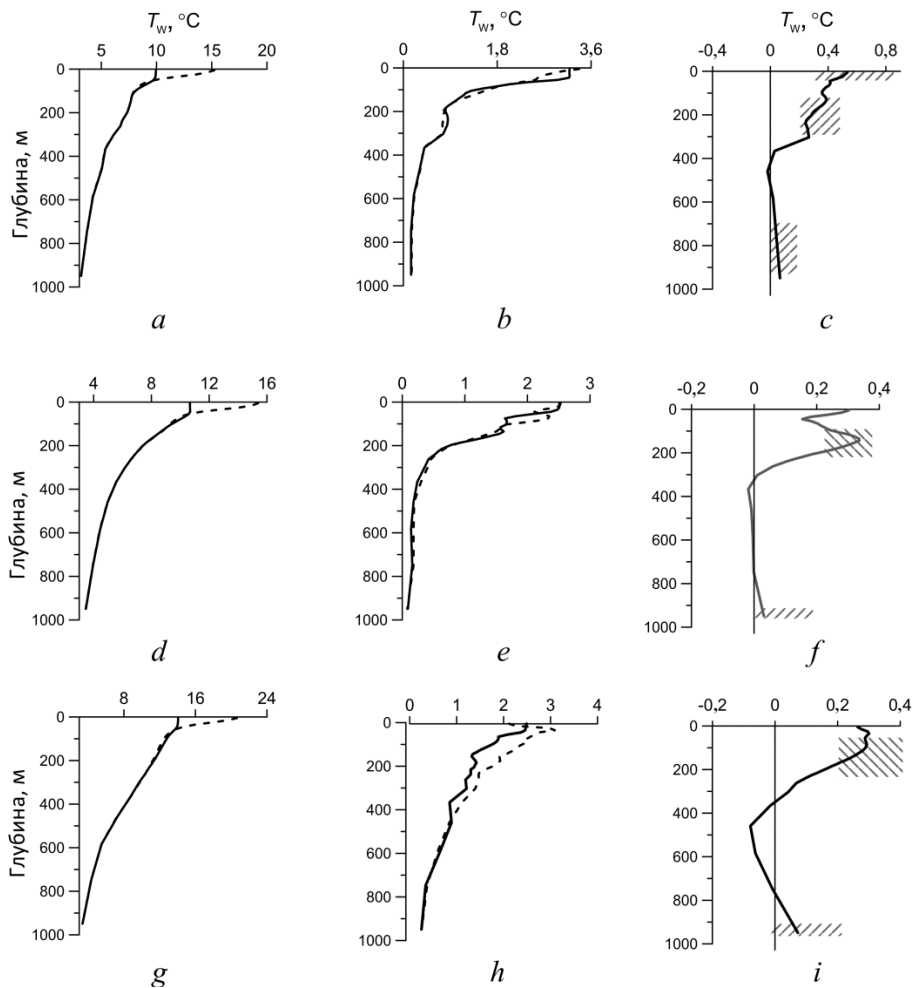
Наглядное представление об особенностях межгодовой изменчивости вертикального распределения T_w , диапазона ее колебаний и тренда на различных горизонтах в центральных областях выделенных районов дает рис. 4. Сезонный цикл прослеживается в основном в верхних 100 м, что отмечалось и до начала фазы современного потепления [6]. Максимальные величины колебаний T_w ($> 2^\circ\text{C}$) наблюдались в верхнем 50–100-метровом слое всех районов (в районе ЮЗ – в холодный сезон до глубины 150 м) (рис. 4, *b, e, h*), а связность между изменениями температуры на различных горизонтах проявляется в вертикальных профилях трендов аномалий T_w (рис. 4, *c, f, i*). Во всех районах в различных участках верхнего 300–350-метрового слоя наблюдается потепление в оба сезона. В нижележащих слоях толщиной 200–400 м знак тренда температуры меняется на противоположный, а глубже 600–800 м вновь становится положительным. Как отмечалось ранее [14, 15], фаза изменений T_w на горизонтах 200–300 м отстает от изменений ТПО на несколько месяцев и более. При этом в связи с ограниченной длиной ряда и характером амплитудно-частотного состава колебаний статистически значимые тренды T_w выделяются только в пределах верхнего 200–300-метрового слоя и в отдельных слоях нижнего участка водной толщи.

За последние 20 лет в толще вод верхнего слоя 5–200 м выделенных районов средняя интегральная температура (как и теплосодержание) увеличилась на 4–8%, а во всем 1000-метровом слое – на 2%, что в 1,5 раза меньше, чем в северо-западном секторе внетропической зоны Тихого океана [24].

Сопоставление рис. 1, *c–h*; 4 и 5 позволяет рассмотреть особенности трехмерной структуры температурных трендов потепления (похолодания) на зональных и меридиональных разрезах в исследуемой акватории. На всех разрезах наибольшие статистически значимые положительные тренды наблюдаются в верхнем 200–300-метровом слое, а отрицательные – главным образом в пределах промежуточного слоя (рис. 5).

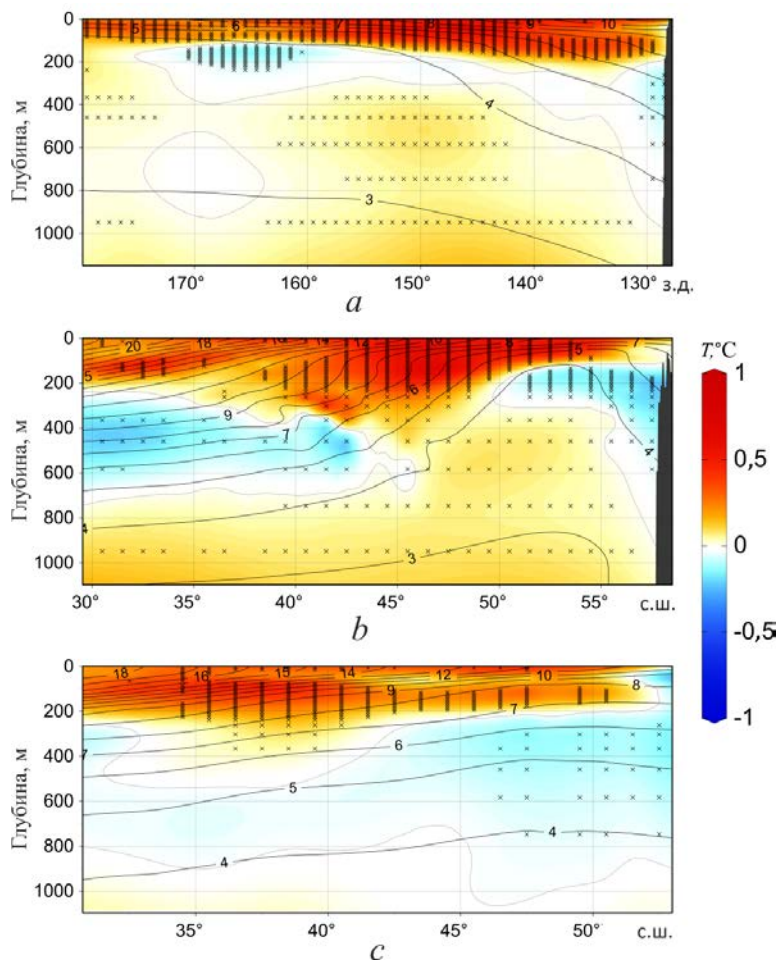
Зональный разрез вдоль 50° с. ш. расположен вблизи границы районов СВ и Ц на южной периферии Аляскинского циклонического круговорота. На западе он пересекает одну из ветвей Аляскинского течения [5], с которой может быть связана область значимых отрицательных трендов T_w на глубине 100–200 м между 160° и 170° з. д. В восточной части разреза прослеживаются отрицательные тренды в зоне апвеллинга [27] (рис. 5, *a*), а область с наибольшими значимыми положительными трендами T_w ($\sim 1^\circ\text{C}/10$ лет) на протяжении всего этого разреза, как и на другом зональном разрезе по 30° с. ш. (другие зональные разрезы не показаны), располагается в верхнем 100–200-метровом

слое. На третьем разрезе вдоль 40° с. ш., расположенном в полосе субарктического фронта [1, 3], нижняя граница этого слоя заглубляется до 300–400 м. На меридиональных разрезах по 170°, 150° и 130° з. д. тенденции потепления также хорошо выражены в верхнем слое области субарктического (полярного) фронта (рис. 5, *b, c*), а похолодания – в промежуточном слое на юго-западе и севере акватории, что хорошо согласуется с картами трендов интегральной температуры (рис. 1, *e, f*).



Р и с. 4. Обобщенные кривые вертикального распределения T_w (*a, d, g*), диапазона ее изменений (*b, e, h*) в теплый (штриховая линия) и холодный (сплошная линия) сезоны и тренда среднегодовой T_w (*c, f, i*) за 2000–2021 гг. Сверху вниз: районы СВ, Ц, ЮЗ. Штриховкой выделены слои со статистически значимыми на уровне 95% величинами трендов среднегодовой температуры воды

F i g. 4. Generalized curves of vertical distribution T_w (*a, d, g*), range of its changes (*b, e, h*) in the warm (dotted line) and cold (solid line) seasons, and trend of the average annual T_w (*c, f, i*) in 2000–2021. From top to bottom: the NE, C and SW areas. Hatching marks the layers with the 95% statistically significant values in the average annual water temperature trends



Р и с. 5. Совмещенное вертикальное распределение среднегодовой T_w (контрастные линии) и трендов аномалий ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) (выделены цветом) за 2000–2021 гг. на зональном разрезе вдоль 50° с. ш. (a) и меридиональных разрезах по 150° з. д. (b) и 130° з. д. (c). Расположение разрезов показано на рис. 1, b

Fig. 5. Joint vertical distribution of the average annual T_w (contrasting lines) and the trends in temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}/10$ years) (highlighted in color) for 2000–2021 on the zonal section along 50° N (a) and the meridional sections along 150° W (b) and 130° W (c). Section locations are shown in Fig. 1, b

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

Был проведен взаимный корреляционный и регрессионный анализ межгодовых вариаций временных рядов аномалий ТПО с изменениями климатических индексов и других параметров, характеризующих состояние и динамику климатической системы за два периода: 1982–2001 гг. (период I) и 2002–2021 гг. (период II), – а также аномалий ΔQ_T в отдельных слоях за второй период. Как отмечалось ранее [8], одним из показателей, характеризующих со-

стояния барической системы, является поле геопотенциала изобарической поверхности AT_{500} (гПа) в средней тропосфере, а вариации аномалий геопотенциала (ΔH_{500}) в регионе тесно связаны с колебаниями ТПО, поля ветра и различных климатических индексов. В течение 1982–2021 гг. на большей части исследуемого района в оба сезона при переходе от первого ко второму периоду наблюдались смена знака тренда аномалий ΔH_{500} и углубление области его положительных значений в районе алеутской депрессии [24]. При этом 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 различных районов северо-восточной части Тихого океана с климатическими индексами в теплый и холодный (в скобках) сезоны за два периода в течение 1982–2021 гг.
SST correlation coefficients for the selected regions of the northeastern Pacific Ocean with climate indices in the warm and cold (in brackets) seasons for two periods during 1982–2021

Показатель / Index	$K_1\Delta H_{500}$	<i>PDO</i>	<i>NP</i>	<i>NPGO</i>	<i>H-NP</i>	<i>PNA</i>	<i>AD</i>
1982–2001							
СВ / NE	-0,4 (-0,5)	0,5 (0,8)	- (-0,5)	0,4 (-0,3)	- (0,3)	-0,4 (-0,6)	0,3 (-)
Ц / С	-0,4 (0,4)	-0,2 (0,0)	- (0,2)	-0,3 (-0,6)	- (-0,6)	-0,3 (0,4)	0,1 (-)
ЮЗ / SW	0,1 (0,7)	-0,8 (-0,9)	- (0,6)	0,4 (0,0)	- (-0,5)	-0,3 (-0,5)	-0,5 (-)
Вся акватория / Whole area	-0,3 (0,5)	-0,2 (-0,2)	- (0,3)	-0,1 (-0,6)	- (-0,7)	-0,2 (-0,6)	0,0 (-)
2002–2021							
СВ / NE	0,0 (0,0)	0,8 (0,8)	- (-0,4)	-0,8 (-0,5)	- (0,0)	0,1 (0,3)	0,5 (-)
Ц / С	0,7 (0,2)	0,4 (0,2)	- (0,1)	-0,7 (-0,6)	- (-0,3)	0,1 (-0,1)	0,4 (-)
ЮЗ / SW	0,0 (0,5)	-0,6 (-0,8)	- (0,8)	-0,1 (-0,3)	- (-0,5)	0,0 (-0,7)	-0,5 (-)
Вся акватория / Whole area	0,6 (0,3)	0,4 (0,2)	- (0,2)	-0,7 (-0,8)	- (-0,4)	0,1 (-0,2)	0,3 (-)

Пр и м е ч а н и е. $K_1\Delta H_{500}$ – временные коэффициенты ЭОФ первой моды вариаций аномалий геопотенциала.

Note: $K_1\Delta H_{500}$ are the EOF time coefficients of the first mode of the geopotential anomaly variations.

В целом по региону в связи с изменениями циркуляции в атмосфере знаки корреляционных связей между изменениями ТПО, ведущих мод аномалий геопотенциала ΔH_{500} и *PDO* за оба 20-летних периода в теплый сезон изменились на противоположные. В это же время усилились удаленное влияние азиатской депрессии (*AD*) и зависимость изменений ТПО от тенденций колебаний уровня поверхности и циркуляционных характеристик океана (*NPGO*), а в зимний сезон ослабли корреляционные связи с колебаниями *H-NP* – показателя градиента атмосферного давления между двумя ведущими ЦДА региона. Кроме того, в выделенных районах отмечались заметные и статистически

значимые коэффициенты корреляции колебаний ТПО с другими индексами – *IPO* и *EP-NP*, значения которых в табл. 2 не приводятся. Вместе с тем, хотя характеристики алеутской депрессии (*NP*) являются здесь одним из основных индикаторов состояния климатической системы [28], изменения *NP*, *IPO*, *PDO* и *NPGO* взаимосвязаны и через атмосферные связи происходят квазисинхронно.

В последние два десятилетия соответствующие корреляционные связи вариаций интегральной температуры в слое 5–200 м и различных индексов наиболее масштабно (по площади влияния, длительности и величине коэффициента корреляции) проявляются со следующими КИ: $K_{1-2}\Delta H_{500}$, *NPGO*, *PDO*, *NP*, *PNA*, *SOI*, *AD*, а также с *H-NP*. Некоторые карты парной регрессии этих связей показаны на рис. 6.

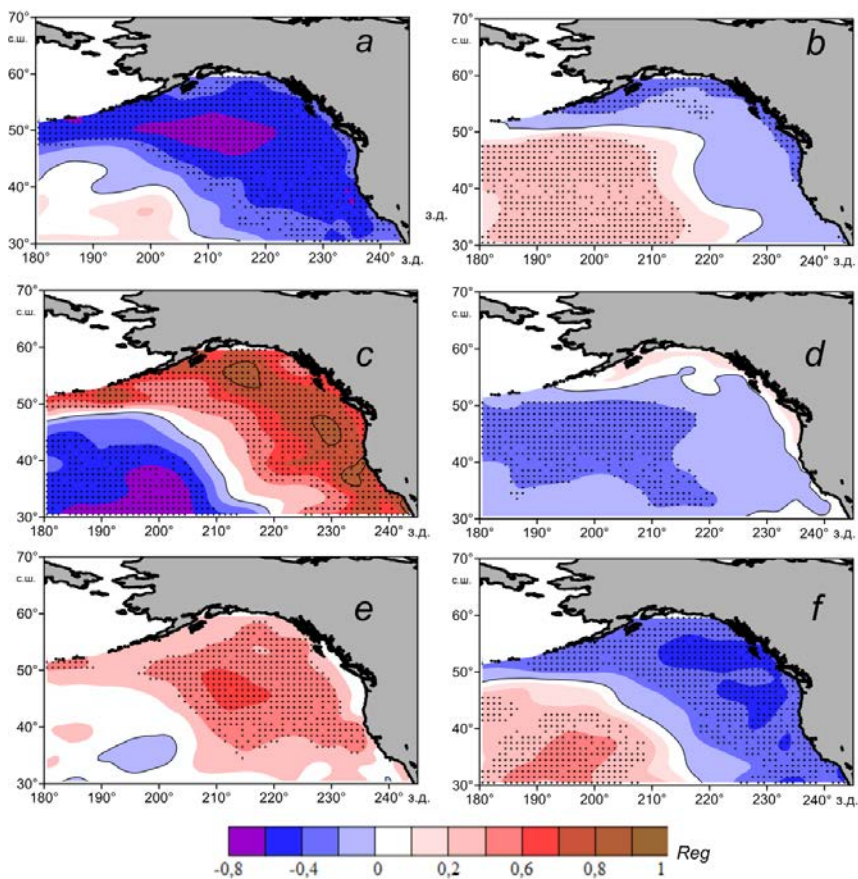


Рис. 6. Коэффициенты линейной регрессии (*Reg*) колебаний аномалий среднегодовых величин интегральной температуры (ΔQ_T) в слое 5–200 м с климатическими индексами *NPGO* (*a*), *PDO* (*c*) и $K_1\Delta H_{500}$ (*e*) в теплый (слева) и *NP* (*b*), *H-NP* (*d*) и *SOI* (*f*) в холодный (справа) сезоны 2002–2021 гг.

Fig. 6. Linear regression coefficients (*Reg*) of fluctuations in the anomalies of average annual values of the integral temperature (ΔQ_T) in the 5–200 m layer with the climatic indices *NPGO* (*a*), *PDO* (*c*) and $K_1\Delta H_{500}$ (*e*) in the warm (left), and *NP* (*b*), *H-NP* (*d*) and *SOI* (*f*) in the cold (right) seasons in 2002–2021

Основные черты пространственного распределения исследуемых характеристик хорошо согласуются между собой, так как режимы климатической изменчивости в исследуемом районе, параметризуемые различными КИ, связанными с атмосферными воздействиями [12], не являются независимыми. На всех картах хорошо выражена бимодальная структура поля рассматриваемых регрессионных связей, согласующаяся с распределением трендов аномалий интегральной температуры (рис. 1, *c, d*), ТПО (рис. 2) и ведущих мод ЭОФ ΔQ_T (рис. 3).

Первые три моды ЭОФ межгодовых колебаний поля аномалий интегральной температуры верхнего слоя 5–200 м (ΔQ_T), описывающие главные особенности его структуры и 70% изменчивости, тесно связаны с крупномасштабными процессами в океане и атмосфере через соответствующие климатические индексы (табл. 3). При этом статистически значимые связи третьей моды $K_3\Delta Q_T$ с рассматриваемыми КИ не выражены.

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Коэффициенты корреляции среднегодовых величин главных компонент ЭОФ аномалий среднегодовой интегральной температуры в слое 5–200 м с различными КИ в 2002–2021 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 2002–2021

Параметр / Parameter	<i>PDO</i>	<i>NP</i>	<i>NPGO</i>	<i>H-NP</i>	<i>PNA</i>	<i>AD</i>	<i>SOI</i>	$K_1\Delta H_{500}$	$K_2\Delta H_{500}$
$K_1\Delta Q_T$	0,8/0,8	-/-0,2	-0,7/-0,7	-/-0,1	0,0/0,2	0,6/-	-0,3/- 0,6	0,4/0,0	-0,5/-0,6
$K_2\Delta Q_T$	0,2/-0,4	-0,5	-0,6/-0,4	-/- 0,5	0,4/-0,5	-0,1/-	0,2/-0,1	0,5/0,5	0,0/0,2

П р и м е ч а н и е. K_1, K_2 – временные коэффициенты первых мод ЭОФ разложений полей ΔQ_T и ΔH_{500} .

N o t e. K_1, K_2 are the EOF time coefficients of the first modes of decomposition of the ΔQ_T and ΔH_{500} fields.

Для большинства климатических переменных плотность статистически значимых корреляционных связей межгодовых колебаний ΔQ_T в верхнем слое с различными КИ ослабевает по мере увеличения глубины, номера моды и ее вклада в суммарную дисперсию изменчивости интегральной температуры. Изменения температуры происходят не только на поверхности, они распространяются на более глубокие слои океана и могут быть связаны (а также не связаны) с изменением режима верхних слоев [29]. В нижележащих слоях линейные связи с нулевым временным лагом проявляются только в юго-западном районе с индексами $K_2\Delta H_{500}$, *NPGO*, *PDO* и *AD*. Ниже приведены оценки величин коэффициентов детерминации (доля объясненной дисперсии – *D*, %) множественной регрессии совокупности колебаний различных климатических переменных (КИ) за теплый и холодный (в скобках) сезоны и первых двух мод ЭОФ среднегодовых аномалий интегрального содержания тепла в слое 5–200 м:

$K_1\Delta Q_T: K_2\Delta H_{500}, NPGO, PDO, AD: D = 89\%$,
 $(K_1\Delta Q_T): K_2\Delta H_{500}, NPGO, PDO, SOI: D = 87\%$,
 $K_2\Delta Q_T: K_1\Delta H_{500}, NPGO: D = 37\%$,
 $(K_2\Delta Q_T): (K_1\Delta H_{500}), NP, H-NP: D = 26\%$.

Приведенные оценки показывают, что действительно статистически значимые связи изменчивости теплосодержания с вариациями основных климатических переменных ослабевают с увеличением номера моды. В исследуемом районе наибольший вклад в изменчивость первой моды обеспечивают процессы, параметризуемые индексами *PDO* и *NPGO* в оба сезона года, а в изменчивость второй моды – индексом *NPGO* в теплый сезон (табл. 3). Во внетропических зонах изменения потоков тепла на поверхности и динамика океана вносят основной вклад в изменения теплосодержания подповерхностных слоев, а связанные с ними процессы охватывают широкий диапазон масштабов [30, 31]. Причины и механизмы выявленных связей сложны и неоднозначны, и основные из них в целом по району тихоокеанской субарктики рассматривались ранее [18, 20, 24, 32, 33]. Поэтому во избежание повторений в настоящем исследовании акцент сделан главным образом на оценку их статистической значимости за два последние десятилетия.

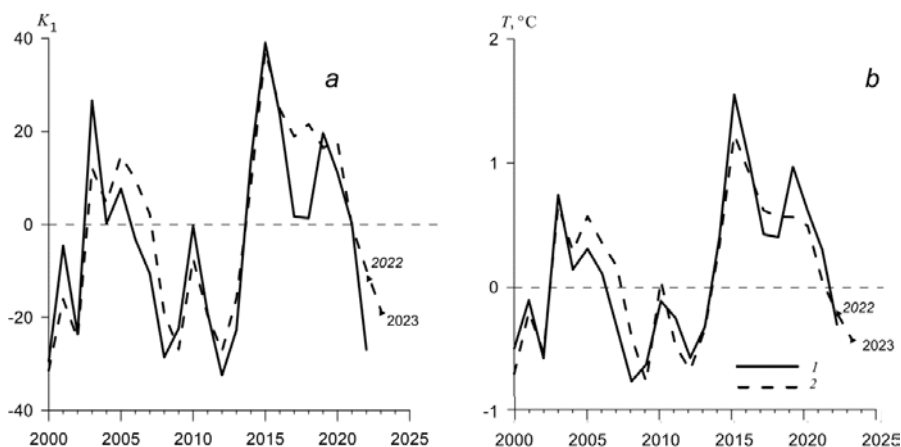


Рис. 7. Межгодовые изменения временных коэффициентов первой моды K_1 ЭОФ ΔQ_T в слое 5–200 м в холодный период года и аппроксимирующих значений уравнения множественной регрессии (а); то же – для аномалий ТПО в районе СВ (б). Годы 2022 и 2023 на кривых 2 обозначают прогнозные оценки. Обозначения: 1 – исследуемые параметры, 2 – аппроксимирующие кривые
Fig. 7. Interannual changes in time coefficients of the EOF K_1 first mode ΔQ_T in the 5–200 m layer during the cold period of a year and the approximating values of the multiple regression equation (a); the same is for the SST anomalies in the NE region (b). The years 2022 and 2023 on curves 2 denote the forecast estimates. Designations: 1 – the studied parameters, 2 – the approximating curves

С учетом выявленных связей основные черты межгодовой изменчивости характеристик термических условий региона с крупномасштабными процессами в океане и атмосфере можно описать (аппроксимировать) с использованием уравнения множественной регрессии зависимой переменной (y) и группы независимых переменных. Для примера на рис. 7 приведены результаты ап-

проксимации, где в качестве зависимых переменных выбраны ряды межгодовых колебаний временных коэффициентов первой моды ЭОФ ΔQ_T в слое 5–200 м и АТПО по району СВ, а в качестве независимых (предикторов) – индексы $K_2\Delta H_{500}$, $NPGO$, PDO , SOI (для первой переменной) и $NPGO$, PDO (для второй). Коэффициент корреляции между этими зависимыми переменными, характеризующими тенденции изменений термических условий в период 2000–2021 гг., высокий – 0,93, а между аппроксимирующими их функциями – 0,98.

Аппроксимирующие кривые *у* на рис. 7 хорошо воспроизводят межгодовые изменения зависимых переменных, включая экстремально теплые 2014–2016 и 2019–2020 гг. [15]. Путем подстановки в уравнение множественной регрессии коэффициентов полиномиального тренда 5-й степени этих независимых переменных (климатических индексов) были определены тенденции возможных изменений термических условий в следующем (текущем) 2022 г., а также, с учетом поступления новых данных за зиму 2021–2022 гг., – в 2023 г. Они указывают на то, что процесс уменьшения АТПО (синхронно с величиной временных коэффициентов ЭОФ ΔQ_T) после отмечавшегося выше максимума 2019–2020 гг. может продолжиться (рис. 7), несмотря на общие тенденции роста для всего региона (см. табл. 1). В то же время эти «прогнозные оценки» для коэффициентов первой моды ЭОФ ΔQ_T оказались несколько хуже, чем для ТПО, в связи с недостаточно полным учетом возможного перечня предикторов.

Заключение

В последние два десятилетия исследуемый район отличался более высокими темпами потепления, чем за аналогичный предшествующий период, в то время как в сопредельном районе северо-западной части Тихого океана наблюдалась противоположная тенденция. За первые десятилетия XXI в. в среднем на всей акватории внетропической зоны северо-восточной части Тихого океана величина положительных трендов ТПО увеличилась в 4 раза. В отдельные годы этого периода в северо-восточном и центральном районах акватории формировались наибольшие положительные аномалии среднегодовых величин ТПО, составляющие в среднем по району $\sim 1,3^\circ\text{C}$.

Статистически значимые тренды температуры и интегральной температуры воды в отдельных слоях различного знака и величины прослеживаются в пределах всей 1000-метровой толщи вод. Наибольшие положительные тренды этих характеристик выражены в верхнем 200–300-метровом слое также в северо-восточном и центральном районах акватории. В целом за последние 20 лет теплосодержание верхнего 200-метрового слоя увеличилось на 5%, а 1000-метрового – на 2%, что в 1,5 раза меньше, чем в северо-западном секторе внетропической зоны Тихого океана, где в отличие от поверхности потепление толщи вод проходило более высокими темпами. Одной из возможных причин различия скорости потепления в этих районах в течение рассмотренных фаз климатических изменений является перестройка атмосферной циркуляции и прежде всего – изменения положения и выраженности Алеутской депрессии.

В последние два десятилетия корреляционные связи вариаций интегральной температуры верхнего слоя океана с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере наиболее масштабно (по площади влияния, длительности и величине коэффициента корреляции) проявляются через следующие климатические индексы: $K_{1-2}\Delta H_{500}$, *NPGO*, *PDO*, *NP*, *PNA*, *SOI*, *AD*, а также *H-NP*. Плотность статистически значимых корреляционных связей ослабевает по мере увеличения глубины, номера ведущей моды колебаний и ее вклада в суммарную дисперсию изменчивости интегральной температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. <https://doi.org/10.1029/2001GL013806>
2. The Transition Region Mode Water of the North Pacific and Its Rapid Modification / H. Saito [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2011. Vol. 41, iss. 9. P. 1639–1658. <https://doi.org/10.1175/2011JPO4346.1>
3. *Favorite F., Dodimead A. J., Nasu R.* Oceanography of the Subarctic Pacific region, 1960-71. Vancouver, Canada, 1976. 187 p. (International North Pacific Fisheries Commission Bulletin ; No. 33). URL: <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/17465.pdf> (date of access: 20.10.2022).
4. *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. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<0353:LSVITM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0353:LSVITM>2.0.CO;2)
5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103461>
6. *Barnett T. P.* On the Nature and Causes of Large-Scale Thermal Variability in the Central North Pacific Ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, iss. 7. P. 887–904. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0887:OTNACO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0887:OTNACO>2.0.CO;2)
7. The North Pacific Oxygen Uptake Rates over the Past Half Century / E. Y. Kwon [et al.] // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29, iss. 1. P. 61–76. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00157.1>
8. *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. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-162-178>
9. *Archer C. L., Caldeira K.* Historical trends in the jet streams // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, iss. 8. L08803. <https://doi.org/10.1029/2008GL033614>
10. *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. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4521>
11. *Trenberth K. E., Fasullo J. T.* An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future*. 2013. Vol. 1, iss. 1. P. 19–32. <https://doi.org/10.1002/2013EF000165>
12. Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave / D. J. Amaya [et al.] // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, iss. 1. 1903. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15820-w>
13. Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific / N. A. Bond [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42, iss. 9. P. 3414–3420. <https://doi.org/10.1002/2015GL063306>
14. 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. <https://doi.org/10.3390/cli6030062>

15. *Ross T., Jackson J., Hannah C.* The Northeast Pacific: Update on marine heatwave status and trends // PICES Press. 2021. Vol. 29, no. 1. P. 46–48. URL: <https://meetings.pices.int/publications/pices-press/volume29/PPJan2021.pdf#page=46> (date of access: 20.10.2022).
16. *Di Lorenzo E., Mantua N.* Multi-year persistence of the 2014/15 North Pacific marine heatwave // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6, iss. 11. P. 1042–1047. <https://doi.org/10.1038/nclimate3082>
17. Removing the Effects of Tropical Dynamics from North Pacific Climate Variability / Y. Zhao [et al.] // Journal of Climate. 2021. Vol. 34, iss. 23. P. 9249–9265. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0344.1>
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. 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. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00548.1>
20. *Hartmann B., Wendler G.* The Significance of the 1976 Pacific Climate Shift in the Climatology of Alaska // Journal of Climate. 2005. Vol. 18, iss. 22. P. 4824–4839. <https://doi.org/10.1175/JCLI3532.1>
21. Interannual to Decadal Variability of the Upper-Ocean Heat Content in the Western North Pacific and Its Relationship to Oceanic and Atmospheric Variability / H. Na [et al.] // Journal of Climate. 2018. Vol. 31, iss. 13. P. 5107–5125. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0506.1>
22. A Hybrid Global Ocean Data Assimilation System at NCEP / S. G. Penny [et al.] // Monthly Weather Review. 2015. Vol. 143, iss. 11. P. 4660–4677. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00376.1>
23. World Ocean Database 2018 / T. P. Boyer [et al.] ; tech. ed. A. V. Mishonov. Silver Spring, MD : U.S. Department of Commerce, 2018. 207 p. (NOAA Atlas NESDIS 87). URL: https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/wod_intro_0.pdf (date of access: 20.10.2022)
24. *Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И.* Межгодовая изменчивость термических характеристик верхнего 1000-метрового слоя внетропической зоны северо-западной части Тихого океана на рубеже XX–XXI веков // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 157–176. EDN ALOUMA.
25. *Лучин В. А., Матвеев В. И.* Межгодовая изменчивость термического состояния холодного подповерхностного слоя Охотского моря // Известия ТИНРО. 2016. Т. 187. С. 205–216.
26. On the Response of the Aleutian Low to Greenhouse Warming / B. Gan [et al.] // Journal of Climate. 2017. Vol. 30, iss. 10. P. 3907–3925. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0789.1>
27. Future changes in coastal upwelling ecosystems with global warming: The case of the California Current System. / P. Xiu [et al.] // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. 2866. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21247-7>
28. *Overland J. E., Adams J. M., Bond N. A.* Decadal Variability of the Aleutian Low and Its Relation to High-Latitude Circulation // Journal of Climate. 1999. Vol. 12, iss. 5. P. 1542–1548. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1542:DVOTAL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1542:DVOTAL>2.0.CO;2)
29. 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
30. Budgets for Decadal Variability in Pacific Ocean Heat Content / Z. Hu [et al.] // Journal of Climate. 2020. Vol. 33, iss. 17. P. 7663–7678. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0360.1>
31. Western Boundary Currents and Frontal Air–Sea Interaction: Gulf Stream and Kuroshio Extension / K. A. Kelly [et al.] // Journal of Climate. 2010. Vol. 23, iss. 21. P. 5644–5667. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3346.1>

32. 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. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2848.1>
33. *Deser C., Phillips A. S., Hurrell J. W.* Pacific Interdecadal Climate Variability: Linkages between the Tropics and the North Pacific during Boreal Winter since 1900 // *Journal of Climate*. 2004. Vol. 17, iss. 16. P. 3109–3124. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3109:PICVLB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3109:PICVLB>2.0.CO;2)

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