


# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА


Научная статья

УДК 551.583.1:551.46.06 (265)

EDN: HQFPPA

## Проявление и характеристики морских волн тепла в северо-западной части Тихого океана

И. Д. Ростов , Е. В. Дмитриева

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

Поступила в редакцию 14.01.2026; одобрена после рецензирования 30.01.2026;  
принята к публикации 16.03.2026.

### *Аннотация*

*Цель.* Определить характеристики и тенденции межгодовой изменчивости параметров морских волн тепла (МВТ) в северо-западной части Тихого океана за последние два десятилетия, а также проанализировать их причинно-следственные связи с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере – цель настоящей работы.

*Методы и результаты.* Для анализа использовались климатические массивы данных *NOAA*. Применялись стандартные методы идентификации МВТ и оценки их амплитудно-частотных характеристик в узлах регулярной сетки. Результаты позволили детально охарактеризовать пространственно-временную изменчивость МВТ, включая частоту, их продолжительность, интенсивность, интегральные показатели (кумулятивную интенсивность и композитный индекс интенсивности), а также выявить межгодовые и сезонные тенденции в трех выделенных районах, расположенных в различных широтных зонах исследуемой акватории, и определить статистические связи характеристик МВТ с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере.

*Выводы.* В исследуемом районе Тихого океана наблюдается устойчивый рост температуры морской поверхности: в среднем  $\sim 0,5$  °C за 10 лет, с усилением тренда с юга на север (от 0,3 до 2 °C). Межгодовые колебания температуры (периодом 2–5 лет) связаны с индексом *ENSO* (*NINO.W*). За последние два десятилетия среднегодовая частота морских волн тепла составила  $\sim 3$  события в год, увеличиваясь на 1,8 события за десятилетие, средняя продолжительность  $\sim 14$  дней с положительным трендом 5,9 дня/10 лет. Выявлены статистически значимые связи параметров МВТ с крупномасштабными климатическими модами, а также тесная корреляция ( $R > 0,7$ ) с изменениями приземной температуры воздуха и температуры поверхности океана в регионе.

**Ключевые слова:** северо-западная часть Тихого океана, климатические изменения, морские волны тепла, климатические индексы, корреляционные связи


**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы № 124022100079-4 госзадания Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева ДВО РАН «Исследование структуры и динамики вод Мирового океана в условиях современных климатических изменений».

**Для цитирования:** Ростов И. Д., Дмитриева Е. В. Проявление и характеристики морских волн тепла в северо-западной части Тихого океана // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 3. С. 347–364. EDN HQFPPA.

© Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., 2026

## Manifestations and Characteristics of Marine Heat Waves in the Northwestern Pacific Ocean

I. D. Rostov , E. V. Dmitrieva

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

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the study is to determine the characteristics and trends of interannual variability of marine heat wave (MHW) parameters in the northwestern Pacific Ocean over the past two decades, as well as to analyze their causal-and-effect relations with large-scale and regional processes in the ocean and atmosphere.

**Methods and Results.** Analysis in the study was done using the NOAA climate datasets. Standard methods for identifying marine heat waves and assessing their amplitude-frequency characteristics at the regular grid points were applied. The obtained results made it possible to characterize in detail the spatial-temporal variability of marine heat waves including their frequency, duration, intensity, and integral parameters (cumulative intensity and composite intensity index). Besides, they permitted to reveal the interannual and seasonal trends in three denoted regions located in different latitudinal zones of the area under study, and to determine statistical relations between the marine heat wave characteristics and the large-scale and regional processes in the ocean and atmosphere.

**Conclusions.** The study area of the Pacific Ocean shows a stable increase in sea surface temperature, namely on average by  $\sim 0.5$  °C over 10 years with a growing trend from south to north (from 0.3 to 2 °C). The interannual fluctuations of sea surface temperature (periodicity is 2–5 years) are related to the changes of ENSO (NINO.W) index. Over the past two decades, the annual average frequency of marine heat waves was  $\sim 3$  events per year increasing by 1.8 events per decade, and its average duration was  $\sim 14$  days, with a positive trend of 5.9 days/10 years. The performed investigations have made it possible to reveal statistically significant relations between the marine heat wave parameters and the large-scale climatic modes, as well as a close correlation ( $R > 0.7$ ) with the changes in surface air and ocean surface temperatures in the region.

**Keywords:** northwestern Pacific Ocean, climate changes, marine heat waves, climate indices, correlation relationships

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of theme of state assignment of V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB of RAS No. 124022100079-4 “Study of structure and dynamics of the World Ocean waters under conditions of modern climate changes”.

**For citation:** Rostov, I.D. and Dmitrieva, E.V., 2026. Manifestations and Characteristics of Marine Heat Waves in the Northwestern Pacific Ocean. *Physical Oceanography*, 33(3), pp. 387-403.

### Введение

Северо-западная часть Тихого океана характеризуется сложными климатическими и океанологическими условиями. Здесь наблюдаются сильные пограничные течения, значительные меридиональные перепады и пространственно-временные колебания температуры и солености воды, а также влияние муссонов и тайфунов, что формирует особый климат. Эти условия оказывают значительное влияние на прибрежные экосистемы, судоходство, рыболовство и другие виды деятельности в регионе.

Морские волны тепла (МВТ) – это дискретные экстремальные события, проявляющиеся в сильных положительных аномалиях температуры на поверхности или в верхнем слое океана. Они возникают вследствие атмосферных

и/или океанических процессов [1] и характеризуются несколькими ключевыми параметрами: частотой возникновения, длительностью, интенсивностью, скоростью эволюции и пространственной протяженностью [2]. Морские волны тепла могут охватывать области от нескольких километров до нескольких тысяч километров и длиться от пяти дней до нескольких месяцев [3]. Такие явления способны оказывать разрушительное воздействие на морские экосистемы и провоцировать негативные социально-экономические последствия [4]. Качественно МВТ определяются [5] как дискретные периоды продолжительной аномально теплой воды на поверхности в определенном месте, а количественные определения основаны на температурах океана, превышающих фиксированные, сезонно меняющиеся или кумулятивные пороговые значения.

Формирование МВТ обусловлено комплексом локальных процессов в верхнем перемешанном слое. Эти процессы регулируются климатическими режимами и их дальними связями [6] через «атмосферные мосты» [7]. Механизмы их формирования и поддержания сложны и многообразны и зависят от баланса источников тепла и других факторов [8]. Специальные метрики для количественной оценки МВТ позволяют сравнивать события в разных районах и в разное время [2, 9].

Спутниковые наблюдения показывают, что за последние десятилетия в большинстве районов Мирового океана, включая северо-западную часть Тихого, произошло значительное увеличение частоты, продолжительности и интенсивности МВТ, в первую очередь вследствие постепенного потепления его поверхности [3]. Наибольшие изменения характеристик МВТ в будущем ожидаются в западной тропической части Тихого и в Северном Ледовитом океане [10]. По мере глобального потепления верхний перемешанный слой океана становится тоньше, что делает его более восприимчивым к экстремальным потеплениям [11] Это приводит к более резким температурным колебаниям и увеличению частоты и интенсивности МВТ особенно в мелководных окраинных морях [12, 13].

Примерно с 2013 г. скорость потепления в северной части Тихого океана значительно увеличилась по сравнению с другими бассейнами [14]. Совокупное воздействие МВТ, вредоносного «цветения» водорослей (ВЦВ) [15], усиления стратификации, закисления вод и снижения концентрации кислорода создает серьезную угрозу для прибрежных экосистем [16]. Степень их влияния на морские организмы и экосистемы в значительной мере регулируется региональными условиями [17] и климатическими режимами [18].

Северо-западная область Тихого океана выделяется своей повышенной уязвимостью из-за высокого содержания растворенного неорганического углерода и низкого уровня кислорода. Этот регион стал одним из тех, где в последние десятилетия произошли заметные изменения в экологических условиях [19, 20]. Самые сильные, самые продолжительные и самые масштабные события, имеющие катастрофические последствия для морских экосистем и различных секторов экономики региона, происходили здесь в последнее десятилетие. Мелководный полузамкнутый регион континентального шельфа акватории окраинных морей Восточной Азии признан важной точкой распространения МВТ с сопутствующим им ВЦВ [21]. Рекордные морские волны

тепла наблюдались летом и осенью 2020 г. [22, 23], а в июле – августе 2021 г. интенсивные МВТ охватили обширные акватории, включая Японское и часть Охотского моря. Распределение МВТ было тесно связано с потоками тепла на поверхности моря, что указывает на ведущую роль атмосферного воздействия в их формировании. Через месяц после спада наиболее интенсивных МВТ у юго-востока о. Хоккайдо произошла вспышка ВЦВ [23, 24]. Это событие было синхронизировано с углублением перемешанного слоя на завершающей стадии развития МВТ и сопровождалось подъемом питательных веществ из глубинных слоев. Летом 2022 г. беспрецедентные по продолжительности (168 дней) МВТ в субарктической зоне достигли интенсивности  $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  и охватили более  $1,5\text{ млн км}^2$ , затронув Охотское, западную часть Берингова и Восточно-Китайское море [25].

Наиболее интенсивные МВТ в регионе наблюдаются летом, когда верхний перемешанный слой наиболее тонок. Максимальная изменчивость аномалий температуры поверхности океана (ТПО), интенсивность и продолжительность МВТ в исследуемом районе наблюдались в области Продолжения (расширения) Куроиси – Ойяиси ( $35\text{--}44^{\circ}$  с. ш.,  $141\text{--}175^{\circ}$  в. д.), где летний муссон оказывает значительное влияние [26]. Установлено, что экстремальные проявления МВТ усиливались в периоды Эль-Ниньо, а их интенсивность зависела от толщины верхнего перемешанного слоя и имела сезонный ход [27].

Большинство случаев генерации морских волн тепла в регионе связано с формированием устойчивых субтропических антициклонов и аномально слабых ветров. Это приводит к снижению облачности, увеличению притока солнечной радиации, ослаблению теплоотдачи океана и усилению чистого теплового притока в поверхностный слой. Ослабление ветра также усиливает стратификацию и уменьшает глубину перемешанного слоя, способствуя экстремальному прогреву поверхности.

Эти процессы модулируются низкочастотными климатическими режимами – в первую очередь фазами Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК – *ENSO*) [27], Тихоокеанской декадной осцилляции (*PDO*) и Индоокеанского диполя (*DMI*), которые усиливают меридиональный перенос тепла из тропиков в умеренные широты. Избыток тепла формируется за счет усиления конвекции и поступления скрытого тепла экстремальных осадков, а его дальнейший перенос осуществляется посредством планетарных волн Россби [28].

Следует отметить, что проявления МВТ на поверхности тропической западной части Тихого океана относительно слабы [29, 30], однако усиливаются в подповерхностном слое ( $50\text{--}300\text{ м}$ ) [14] и в большей степени обусловлены динамическими факторами [14, 27, 31].

В 2010–2016 гг. в регионе Ойяиси наблюдались интенсивные летние МВТ [32]. Их интенсивность усиливалась за счет осевой миграции Продолжения Куроиси [26], смещения фронтов, изменений адвекции тепла и влияния теплых антициклонических мезомасштабных вихрей [27, 32], которые отделялись от основного течения каждое лето этого периода. Эти локальные МВТ у о. Хоккайдо оказали серьезное негативное воздействие на рыболовство [33].

В целом факторы, определяющие начало и завершение МВТ, разнообразны и зависят от региона, сезона и масштаба события [34]. Океаническая адвекция играет ключевую роль в формировании МВТ малого масштаба, в то

время как для крупномасштабных событий основным драйвером являются атмосферные процессы. С увеличением пространственного масштаба МВТ, как правило, становятся менее интенсивными, но более продолжительными [6]. Во время экстремальных потеплений наблюдается ослабление вертикального перемешивания, усиление стратификации, что снижает поступление питательных веществ к поверхности и ухудшает условия кислородного режима [35]. При этом более частые случаи МВТ проявлялись в прибрежных районах морей Восточной Азии и вдоль оси течения Куроисио [28, 36, 37].

Несмотря на признаваемую важность исследования событий МВТ, пространственно-временные особенности их проявления, региональные характеристики и связь с локальными процессами в муссонном климате региона изучены недостаточно. Цель данной работы — определить характеристики и тенденции межгодовой изменчивости параметров морских волн тепла в различных климатических поясах акватории северо-западной части Тихого океана между экватором и  $45^\circ$  с. ш. за последние два десятилетия, а также уточнить возможные причинно-следственные связи этих событий с крупномасштабными и региональными климатическими процессами.

### Данные и методы

В качестве основного источника информации использовались данные оптимальной интерполяции ежедневной температуры поверхности океана (*NOAA OI SST, V2*) в узлах сетки  $0,25 \times 0,25^\circ$  за 1982–2024 гг. (<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>).

Для выявления и анализа морских волн тепла применялся метод их идентификации, предложенный в работе [2]. Событие МВТ определялось как период, в течение которого температура поверхности превышает 90-й процентиль сезонно-скорректированного климатического уровня на протяжении не менее пяти последовательных суток. События, разделенные интервалом менее трех суток, объединялись в одно. В качестве базового климатического периода использовались данные за 1988–2018 гг., их обработка проводилась с помощью программного обеспечения *MATLAB* [38]. В каждом узле сетки, а также в среднем по региону были определены ключевые метрики МВТ [2, 9]:

- частота – количество событий МВТ в год ( $F$ );
- продолжительность – количество дней между началом и окончанием МВТ ( $D$ , сут);
- средняя интенсивность одного явления МВТ – средняя величина аномалии ТПО за весь период события, рассчитанная как отклонение от климатической нормы ( $I_{\text{mean}}$ ,  $^\circ\text{C}$ );
- максимальная интенсивность – наибольшее значение аномалии ТПО, зафиксированное в пределах продолжительности события ( $I_{\text{max}}$ ,  $^\circ\text{C}$ );
- кумулятивная (суммарная) интенсивность за одно событие ( $I_{\text{cum}}$ ,  $^\circ\text{C}$ );
- интегральный композитный индекс интенсивности, учитывающий количество, длительность и силу всех зарегистрированных событий за весь период ( $ICI$ ,  $^\circ\text{C}\cdot\text{сут}$ ).

Для анализа сопутствующих атмосферных условий и климатических факторов использовались:

– данные реанализа приземной температуры воздуха и атмосферного давления (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>);

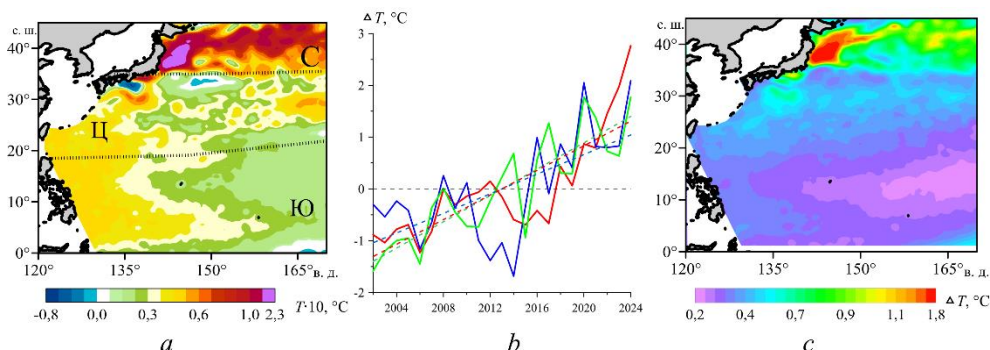
– временные ряды климатических индексов *NPGO*, *PDO*, *IPO*, *NINO.WEST* [23] и индекс дипольной моды Индийского океана (*DMI*) (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/index.html>, <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>).

Также использовался индекс Западно-Тихоокеанский субтропический максимум (*WPSH*) с сайта Китайского метеорологического агентства (*CMA*, [https://cmdp.ncc-a.net/download/precipitation/diagnosis/NWP\\_high/wpsh\\_idx.txt](https://cmdp.ncc-a.net/download/precipitation/diagnosis/NWP_high/wpsh_idx.txt)).

По данным о межгодовой изменчивости ТПО и МБТ выделены три обособленных района, расположенных в различных широтных зонах акватории: северный (С), центральный (Ц) и южный (Ю). В дальнейшем путем простого осреднения сеточных данных по всей площади этих районов рассчитывался многолетний ход ключевых характеристик МБТ в каждом из них.

### Современные тенденции потепления на акватории северо-западной части Тихого океана

В последние два десятилетия в среднем в акватории исследуемого района наблюдаются устойчивые положительные статистически значимые линейные тренды межгодовых изменений температуры морской поверхности (рис. 1, *a*). Значения трендов увеличиваются с юга на север: от 0,3 °С за 10 лет в южном районе до 2 °С за 10 лет в западной части северного, а в целом по региону они составляют ~ 0,5 °С за 10 лет.



**Р и с. 1.** Тренды аномалий среднегодовой ТПО для периода 2002–2024 гг. – *a* (С – северный район, Ц – центральный, Ю – южный); межгодовая изменчивость аномалий ТПО – *b* (сплошные линии – аномалии ТПО, штриховые – линейные тренды, красные линии соответствуют северному району, синие – центральному, зеленые – южному); среднеквадратические отклонения ТПО за указанный период – *c*

**F i g. 1.** Trends in annual average SST anomalies for 2002–2024 – *a* (N – northern, C – central and S – southern regions); interannual variability of SST anomalies – *b* (solid lines are SST anomalies, dashed lines – linear trends, red lines correspond to the northern region, blue lines – to the central region, and green ones – to the southern region); SST standard deviations for the denoted period – *c*

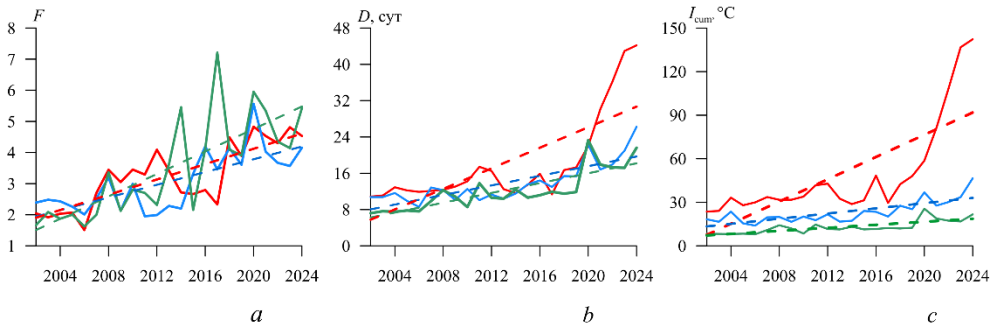
Северный район, расположенный в полосе широт между 35 и 45° с. ш. (рис. 1, *a*), охватывает акватории южной периферии ячейки западного субарктического циклонического круговорота и северной полосы субтропического антициклонического круговорота. Здесь расположены область взаимодействия, смещения и продолжения потоков холодного течения Ойясио и теплого Куроисио, границы и межструктурная зона субарктического фронта (*Oyashio-*

*Kuroshio Transition Zone – OKTZ* [26]). Здесь, в области западных пограничных течений и их продолжений, резкие горизонтальные градиенты ТПО приводят к тому, что даже незначительные пространственные смещения оси течений и положения фронтальных зон трансформируются в крупные (по площади и интенсивности) аномалии ТПО. Именно здесь наблюдаются наиболее заметные тенденции к росту ТПО [30]. Южнее расположены центральный и южный районы, включающие акватории субтропического и тропического климатических поясов, граница между которыми проходит примерно по  $20^\circ$  с. ш. [39], с соответствующими типами термохалинной структуры вод и схемой течений.

Южный район расположен в области тропического теплого бассейна западной части Тихого океана (*WPWP*), в котором значения ТПО круглый год выше  $28^\circ\text{C}$ .

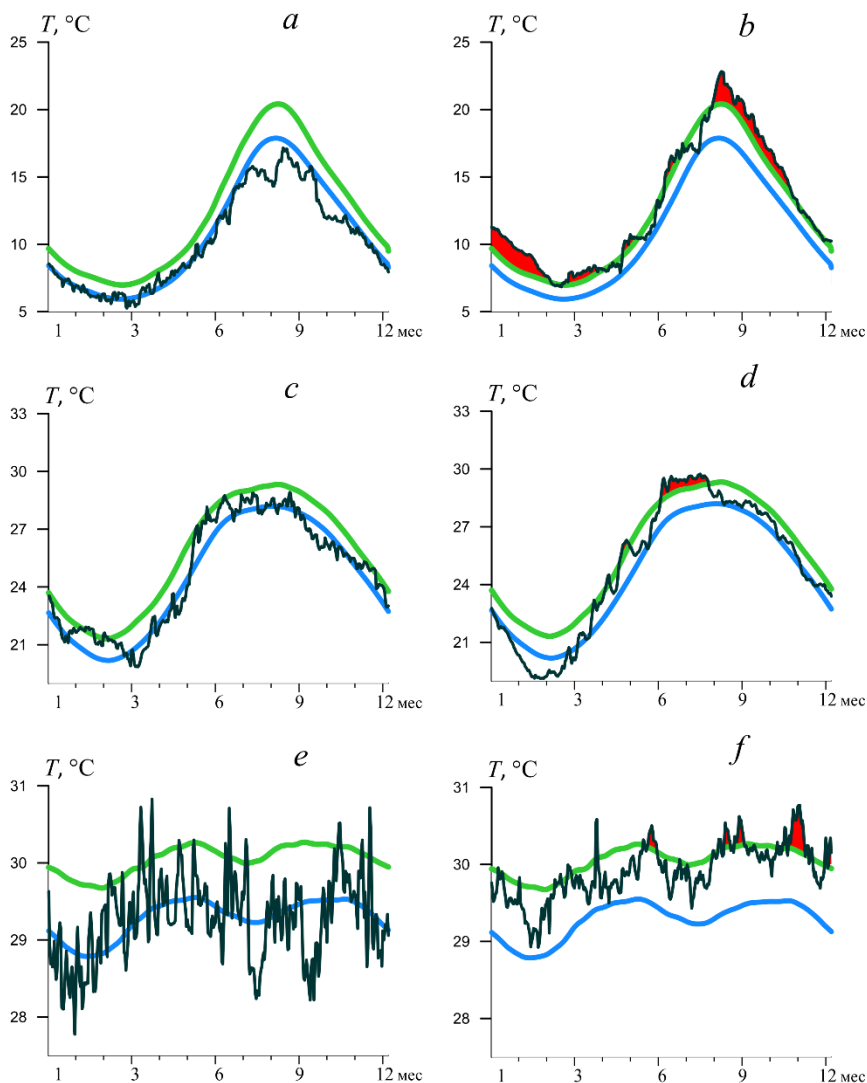
### Среднегодовые показатели характеристик морских волн тепла и их временная изменчивость

Морские волны тепла начали проявляться с начала 1980-х гг. на фоне межгодовых и сезонных изменений температурного режима. Они характеризовались существенной пространственно-временной неоднородностью и постепенно охватывали все большую площадь акватории выделенных районов (рис. 2). Межгодовой ход амплитуд колебаний климатических средних и 90-го перцентиля в сезонном ходе температуры подобен для каждого из районов. Их амплитуда уменьшается в направлении от северного района к южному. В 2002 г. в выбранных участках сеточной области МВТ были совершенно не выражены на поверхности океана, где условия для проявления таких волн, по-видимому, еще не сформировались (рис. 3, *a, c, e*). Напротив, в 2022 г. среднесуточные ТПО заметно превышают 90-й перцентиль, демонстрируя отклик на события МВТ (рис. 3, *b, d, f*). При этом периоды начала, окончания и продолжительности событий МВТ различны в каждом из районов, а в центральном районе они наблюдались только летом (рис. 3, *d*). В 2022 г. в северном районе фиксируется наибольшая продолжительность МВТ по сравнению с другими районами (рис. 3, *b, d, f*).



**Рис. 2.** Регионально усредненные среднегодовые значения частоты (*a*), продолжительности (*b*) и кумулятивной интенсивности (*c*) событий МВТ за период 2002–2024 гг. (сплошные линии – показатель МВТ, штриховые – линейный тренд, красные линии соответствуют северному району, синие – центральному, зеленые – южному)

**Fig. 2.** Regionally averaged annual mean values of frequency (*a*), duration (*b*), and cumulative intensity (*c*) of MHW events for 2002–2024 (solid line is MHW parameter, dashed lines are linear trends, red lines correspond to the northern region, blue lines – to the central region, and green ones – to the southern region)



**Р и с. 3.** Изменение среднесуточных значений ТПО (черные линии), климатологических средних значений ТПО (синие) и пороговых значений 90-го перцентиля (зеленые), осредненных в двухградусных квадратах для центральной части выделенных районов: северного – 42° с. ш. (*a, b*), центрального – 27° с. ш. (*c, d*), южного – 4° с. ш. (*e, f*) в 2002 г. (*слева*) и в 2022 г. (*справа*). Красным цветом обозначены значения ТПО, превышающие 90-й процентиль

**Fig. 3.** Changes in the daily average SST values (black lines), climatological average SST values (blue lines), and threshold values of the 90th percentile (green lines) averaged over  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  grid cells for the central part of the denoted regions: northern – 42° N (*a, b*), central – 27° N (*c, d*), and southern – 4° N (*e, f*) in 2002 (on the left) and in 2022 (on the right). SST values exceeding the 90th percentile threshold are highlighted in red

Предварительные оценки показали, что если в начале 2000-х количество узлов сетки, в которых проявлялись МВТ различной интенсивности и длительности, занимало ~ 60 % площади акватории, то к 2020 г. этими явлениями была охвачена практически вся акватория. При этом частота событий МВТ, их про-

должительность и кумулятивная интенсивность (рис. 2) в регионе в этот период возрастали со значимым трендом, что вызвало катастрофические последствия для морских экосистем и различных секторов экономики региона [24].

В целом по усредненным данным за 2002–2024 гг. по всему исследуемому региону северо-западной части Тихого океана и выделенным подрайонам межгодовые изменения МВТ характеризовались следующими количественными оценками (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Table 1

**Характеристики межгодовых изменений среднегодовых ТПО и МВТ в северо-западной части Тихого океана и в выделенных районах в 2002–2024 гг. Characteristics of interannual changes in the annual average SST and MHW values in the northwestern Pacific Ocean and in the denoted areas in 2002–2024**

Показатель / Parameter	ТПО / SST	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>I</i> <sub>mean</sub>	<i>I</i> <sub>max</sub>	<i>I</i> <sub>cum</sub>
Северный район / Northern region						
Среднее / Average	13,7	3,3	18,2	0,4	3,0	49,7
Максимум / Maximum	15,7	4,8	44,2	2,8	3,8	142,3
Тренд <i>b</i> / Trend <i>b</i>	<b>0,8</b>	<b>1,2</b>	<b>11,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>38,3</b>
Центральный район / Central region						
Среднее / Average	23,4	3,1	13,9	1,6	2,0	23,2
Максимум / Maximum	24,1	5,6	26,3	1,8	2,2	46,6
Тренд <i>b</i> / Trend <i>b</i>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>5,3</b>	0,0	0,0	<b>8,9</b>
Южный район / Southern region						
Среднее / Average	28,7	3,4	12,2	1,0	1,3	12,9
Максимум / Maximum	29,1	7,2	23,3	1,2	1,4	25,6
Тренд <i>b</i> / Trend <i>b</i>	<b>0,3</b>	<b>1,6</b>	<b>5,4</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	<b>5,2</b>

Пр и м е ч а н и е. Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые (95 %) оценки линейного тренда.

Note: Statistically significant (95 %) linear trend estimates are shown in bold.

Согласно нашим исследованиям, установлены следующие особенности ключевых метрик МВТ:

– среднегодовая частота событий МВТ в узлах сетки в среднем по всему региону составляла ~ 3 события в год. Она мало отличалась в выделенных районах и увеличивалась в среднем со скоростью 1,8 события за десятилетие. В южном районе в 2017 г. отмечался абсолютный максимум *F* (7,2 в год). Здесь же наблюдался наибольший положительный тренд *F* (табл. 1). В северном и центральном районах наибольшие максимумы *F* (~ 5–6 событий в год) зафиксированы в 2020 г.;

– средняя продолжительность отдельных событий в среднем по всему району составляла ~ 14 дней, изменяясь в северном, центральном и южном районах в межгодовом ходе от ~ 12 до 18 дней со средним для всей акватории трендом 5,9 дня за 10 лет. Наибольшие значения тренда *D* составляли 11,3 дня за 10 лет и наблюдались в северном районе;

– наибольшие усредненные значения средней, максимальной и кумулятивной интенсивности и их трендов также были отмечены в северном районе, что согласуется с результатами других исследований [26];

– зависимость продолжительности событий МВТ от их частоты характеризуется высокими коэффициентами корреляции ( $R = 0,7$ );

– композитный индекс интенсивности, отражающий интегральное влияние частоты, продолжительности и интенсивности МВТ, тесно коррелирует с межгодовыми изменениями ТПО исследуемых районов ( $R > 0,9$ ). Он особенно высок в аномально теплые 2020 и 2024 гг. (рис.2, *c*).

Необходимо отметить высокую стабильность величин среднегодовых характеристик морских волн тепла в выделенных районах, несмотря на различающиеся тренды ТПО, так как основные механизмы формирования МВТ в этих районах связаны с доминированием одних и тех же синоптических процессов над акваторией региона – с блокирующими антициклонами и застойными барическими полями, а длительность таких ситуаций и синоптическая повторяемость задает естественный временной масштаб МВТ.

### Пространственная структура проявлений МВТ

На рис. 4 показано пространственное распределение характеристик МВТ на исследуемой акватории. Их региональные особенности за последние два десятилетия заключаются в следующем:

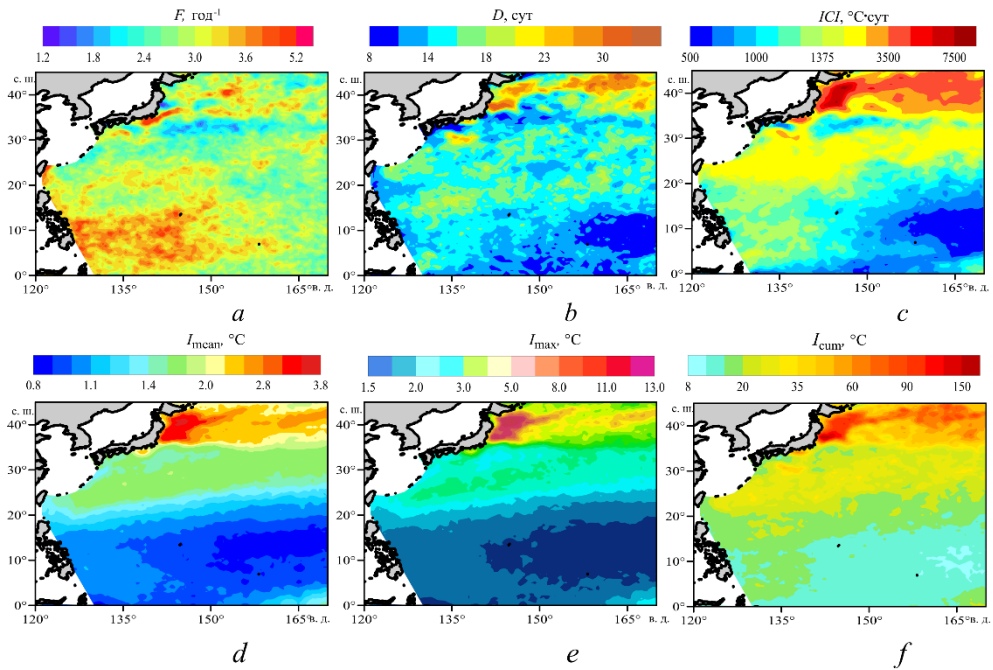
– средняя за период 2002–2024 гг. максимальная частота событий (~5 в год) отмечается в районе восточного побережья о. Хонсю (рис. 4, *a*);

– продолжительность отдельных событий изменяется от 8 до 45 дней (в северной части района, рис. 4, *b*), а в среднем по всему району составляет 15 дней;

– средняя и средняя максимальная интенсивность МВТ (рис. 4, *d, e*), в регионе составляет 1,4 и 2,8 °С соответственно (рис. 4, *d, e*), а их максимальные значения особенно выражены на акватории, расположенной северо-восточнее Японии;

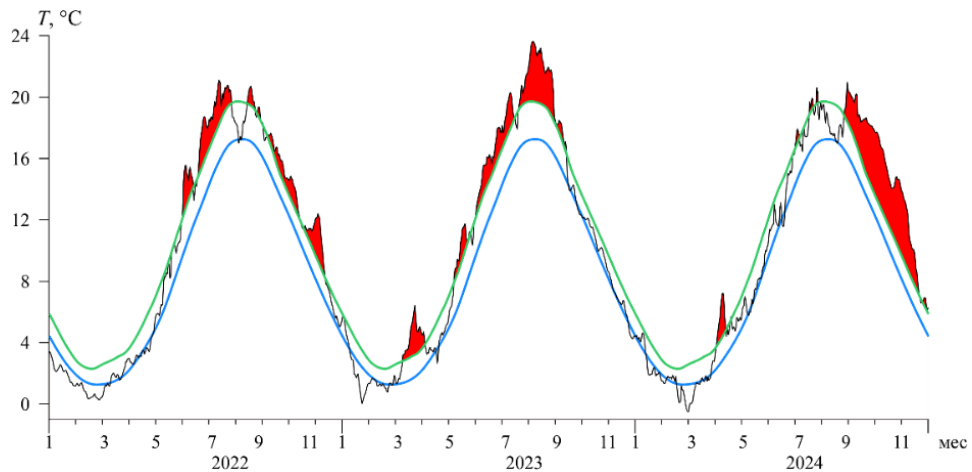
– композитный индекс интенсивности имеет наибольшие значения на акватории северного района и также к северо-востоку от Японии (рис. 4, *c*). Расположение его максимальных значений согласуется с распределением кумулятивного индекса (рис. 4, *f*). Оба индекса являются важным показателем потенциального воздействия МВТ на морские экосистемы, и в 2020–2024 гг. они достигли своих максимальных значений.

Увеличение значений рассматриваемых характеристик могло оказать существенное влияние на недавние случаи массового проявления событий ВЦВ в районе тихоокеанского побережья о-вов Хонсю и Хоккайдо (Япония), данные о которых от различных исследовательских организаций регулярно поступают в международную базу (<https://haedat.iode.org/index.php>). События ВЦВ, произошедшие в 2021 г., в контексте влияния условий среды и развития МВТ уже рассматривались ранее [23, 24]. Опасные изменения экологических условий, вызванные вспышкой вредоносного «цветения» водорослей видов *Karenia*, *Cochlodinium*, *Alexandrium* и *Noctiluca scintillans*, были вновь зафиксированы в 2022–2024 гг. на акваториях различных префектур Японии, расположенных у тихоокеанского побережья в восточной и южной частях о. Хонсю. В этот период МВТ были хорошо выражены и их проявления наблюдались ежегодно с марта по декабрь (рис. 5). Суммарная продолжительность МВТ за год изменялась в диапазоне 123–255 дней.



**Р и с. 4.** Пространственное распределение многолетних усредненных среднегодовых характеристик МВТ за 2002–2024 гг.: частоты событий МВТ – *a*, продолжительности – *b*, композитного индекса интенсивности – *c*, средней интенсивности – *d*, средней максимальной интенсивности – *e*, кумулятивной интенсивности – *f*

**F i g. 4.** Spatial distribution of the MHW long-term average annual characteristics for 2002–2024: MHW event frequency – *a*; duration – *b*; composite intensity index – *c*; mean intensity – *d*; average maximum intensity – *e*; and cumulative intensity – *f*



**Р и с. 5.** Изменение среднесуточных значений ТПО (черные линии) у тихоокеанского побережья о-вов Хонсю и Хоккайдо в 2022–2024 гг., климатологических средних значений ТПО (синие) и пороговых значений 90-го процентиля (зеленые); красным цветом обозначены значения ТПО, превышающие 90-й процентиль

**F i g. 5.** Changes in daily average SST values (black lines) off the Pacific coast of the Honshu and Hokkaido islands in 2022–2024, climatological mean SST values (blue lines) and threshold values of the 90th percentile (green lines); SST values exceeding the 90th percentile are highlighted in red

## Корреляционные связи изменений параметров МВТ с климатическими характеристиками

Был проведен взаимный корреляционный и регрессионный анализ межгодовых вариаций временных рядов характеристик МВТ с климатическими индексами и другими показателями, характеризующими динамику климатической системы атмосферы и океана в исследуемом районе. В целом по региону хорошо выражены корреляционные связи параметров МВТ с ведущими модами крупномасштабных процессов в океане и атмосфере, такими как Тихоокеанская декадная осцилляция, Северо-Тихоокеанская осцилляция субарктического круговорота, Междекадная тихоокеанская осцилляция (*IPO*) и Западно-Тихоокеанский субтропический антициклон, а также показатель ЭНЮК в северо-западной части тропической зоны Тихого океана (*NINO.W*). Эти индексы отражают различные аспекты атмосферной и океанической циркуляции, которые модулируют термические условия в океане, а в основе корреляционных связей между этими индексами и характеристиками МВТ лежат различные физические механизмы, включая изменение океанической циркуляции, адвекцию тепла, атмосферные процессы и вертикальное перемешивание. При этом значение и знак соответствующих коэффициентов корреляции зависит от тенденции изменений, сезонности и фазы колебаний рассматриваемых индексов, меняющей знак в межгодовом ходе. Корреляционный анализ указывает также на тесную ( $R > 0,7$ ) связь большинства характеристик МВТ с изменениями приземной температуры воздуха и ТПО в регионе (табл. 2).

Оценки коэффициентов корреляции между изменениями различных параметров существенно различаются по районам исследуемой области (табл. 2), что обусловлено их климатическими различиями и избирательной чувствительностью акваторий к температурным стрессорам. Так, согласованность колебаний среднегодовой приповерхностной температуры воздуха ( $SST_a$ ) и ТПО усиливается с юга на север: значение  $R$  увеличивается примерно в два раза – до 0,8 в центральном и до 0,88 в северном районе, где сезонный ход температур выражен наиболее четко (рис. 2). В то же время корреляция между ТПО и большинством характеристик МВТ остается высокой и статистически значимой во всех районах. При этом связи МВТ как с ТПО, так и с колебаниями температуры воздуха постепенно ослабевают в направлении от северного района к южному. В южном районе коэффициенты корреляции для большинства характеристик МВТ и  $SAT$  статистически незначимы.

Наблюдается и смена знака корреляции между ТПО и интенсивностью МВТ ( $I_{\text{mean}}$ ,  $I_{\text{max}}$ ) – с отрицательного на юге до положительного на севере (табл. 2). Эту несинхронность можно объяснить сменой доминирующего механизма формирования волн тепла. В тропиках (отрицательная корреляция) основным драйвером выступают атмосферные процессы, а условия формирования МВТ определяются взаимодействием фоновой ТПО с более холодными глубинными слоями. В средних и высоких широтах (положительная корреляция) ключевую роль играет накопление тепла в океанской толще за счет усиленного потока из атмосферы, адвекции теплых вод и малой глубины перемешанного слоя [12]. Неглубокий  $MLD$  формирует устойчивую стратификацию, что способствует концентрации тепла у поверхности и приводит к аномально

высоким температурам в поверхностном слое. Таким образом, высокая фоновая ТПО служит индикатором значительного теплосодержания океана, которое напрямую обуславливает более интенсивные и продолжительные МВТ. Пространственное распределение коэффициентов регрессии  $MLD$  со средней интенсивностью МВТ показывает тесные отрицательные связи между этими параметрами во всех исследуемых районах: уменьшение глубины перемешанного слоя сопровождается ростом  $I_{mean}$  (рис. 6, *a*). За последние два десятилетия тренды уменьшения толщины  $MLD$  были наиболее выражены в северном районе ( $-6,7$  м/10 лет), тогда как в среднем по акватории они составили  $-1,8$  м/10 лет (рис. 6, *b*). Именно в северном районе отмечаются наибольшие значения частоты, продолжительности, интенсивности и кумулятивных характеристик МВТ.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

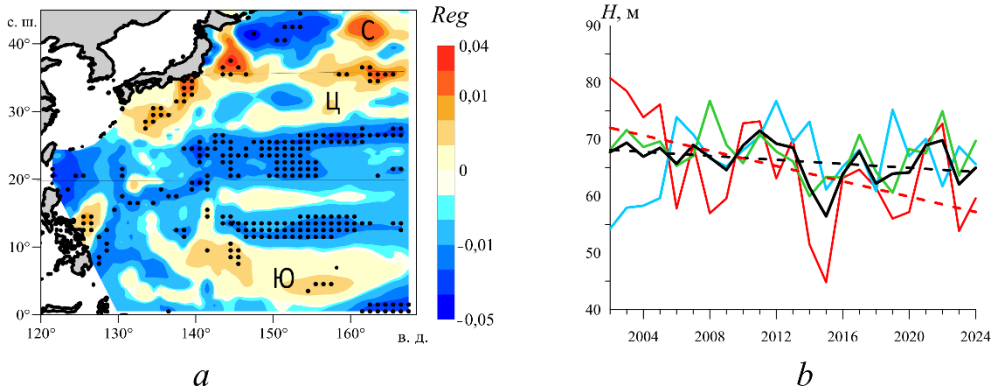
Коэффициенты корреляции ( $R$ ) между характеристиками МВТ и климатическими параметрами за 2002–2024 гг.  
Correlation coefficients ( $R$ ) between MHW characteristics and climatic parameters for 2002–2024

Параметры / Parameters	$F$	$D$	$I_{mean}$	$I_{max}$	$I_{cum}$	$ICI$	ТПО / SST
Северный район / Northern region							
$R/SAT$	<b>0,81</b>	<b>0,79</b>	<b>0,43</b>	<b>0,57</b>	<b>0,78</b>	<b>0,83</b>	<b>0,88</b>
$R/TPO / R/SST$	<b>0,87</b>	<b>0,94</b>	<b>0,68</b>	<b>0,75</b>	<b>0,94</b>	<b>0,97</b>	–
$R/WPSH$	<b>0,46</b>	<b>0,59</b>	<b>0,55</b>	<b>0,63</b>	<b>0,61</b>	<b>-0,60</b>	<b>0,61</b>
$R/NINO.W$	<b>0,71</b>	<b>0,71</b>	<b>0,66</b>	<b>0,73</b>	<b>0,71</b>	<b>0,74</b>	<b>0,78</b>
$R/NPGO$	0,41	<b>-0,52</b>	-0,38	<b>-0,46</b>	<b>-0,53</b>	<b>-0,52</b>	<b>-0,49</b>
Центральный район / Central region							
$R/TPOa / R/SSTa$	<b>0,84</b>	<b>0,62</b>	-0,26	-0,09	<b>0,56</b>	<b>0,73</b>	<b>0,80</b>
$R/TPO / R/SST$	<b>0,91</b>	<b>0,87</b>	0,02	0,16	<b>0,85</b>	<b>0,95</b>	–
$R/WPSH$	<b>0,77</b>	<b>0,81</b>	-0,19	-0,04	<b>0,73</b>	<b>0,82</b>	<b>0,76</b>
$R/NINO.W$	<b>0,64</b>	<b>0,76</b>	-0,16	-0,04	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>	<b>0,62</b>
$R/NPGO$	<b>-0,63</b>	<b>-0,64</b>	0,10	-0,01	<b>-0,62</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,57</b>
Южный район / Southern region							
$R/TPOa / R/SSTa$	<b>0,47</b>	0,26	-0,11	0,05	0,26	<b>0,41</b>	<b>0,45</b>
$R/TPO / R/SST$	<b>0,92</b>	<b>0,84</b>	<b>-0,57</b>	-0,38	<b>0,83</b>	<b>0,93</b>	–
$R/WPSH$	<b>0,62</b>	<b>0,65</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,49</b>	<b>0,61</b>	<b>0,71</b>	<b>0,67</b>
$R/NINO.W$	<b>0,86</b>	<b>0,85</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,49</b>	<b>0,81</b>	<b>0,88</b>	<b>0,90</b>
$R/NPGO$	<b>-0,51</b>	<b>-0,53</b>	<b>0,57</b>	<b>0,48</b>	<b>-0,48</b>	<b>-0,58</b>	<b>-0,54</b>

П р и м е ч а н и е.  $SAT$  и ТПО – межгодовые значения приземной температуры воздуха и поверхности воды по данным реанализа; полужирным шрифтом выделены статистически значимые (95 %) оценки.

N o t e.  $SAT$  and SST are the annual average values of the surface air and sea surface temperatures based on the reanalysis data; statistically significant (95 %) estimates are highlighted in bold.

Почти все параметры МВТ в выделенных районах демонстрируют значимые положительные связи с индексами  $WPSH$  и  $NINO.W$ . Индекс  $WPSH$  характеризует интенсивность и положение западной части Тихоокеанского субтропического максимума. Область высокого давления, расположенная севернее  $10^\circ$  с. ш., блокирует западный перенос, что приводит к снижению облачности и ослаблению ветра [29].



**Р и с. 6.** Пространственное распределение коэффициентов регрессии среднегодовых значений  $I_{\text{mean}}$  со среднегодовыми значениями  $MLD$ , крестиками выделены узлы сетки со статистически значимыми (95%) оценками линейного тренда (а); межгодовая изменчивость глубин  $MLD$ , средних по районам (b). Сплошные линии – значения  $MLD$ , штриховые – линейные тренды за период 2002–2024 гг.; красные линии соответствуют северному району, синие – центральному, зеленые – южному, черные – всей акватории в целом

**Fig. 6.** Spatial distribution of regression coefficients between the  $I_{\text{mean}}$  and  $MLD$  annual values, crosses mark grid nodes with statistically significant (95%) estimates of the linear trend (a); interannual variability of the averaged over regions  $MLD$  depths (b). Solid lines are the  $MLD$  values, dashed ones – the linear trends for 2002–2024; red lines correspond to the northern region, blue lines – to the central region, green lines – to the southern region, and black ones – to the entire water area as a whole

Наблюдаемое в последние 30 лет усиление, расширение и смещение  $WPSH$  к западу подавляет облачность, ослабляет муссонную циркуляцию и увеличивает инсоляцию. В результате усиливается прогрев поверхностных вод, происходит накопление тепла в океане, а также увеличиваются частота, продолжительность и интенсивность МВТ [28]. Статистически значимые корреляции между  $WPSH$  и параметрами МВТ во всех районах подтверждают эту связь (табл. 2).

Сильные корреляционные связи характеристик МВТ с индексом  $NINO.W$  показывают, что аномалии ТПО в западной экваториальной части Тихого океана являются ключевым фактором экстремальных потеплений в регионе. Это приводит к накоплению тепла в поверхностном слое, усилению интенсивности и увеличению продолжительности МВТ (табл. 2). Таким образом, выявленные связи отражают локальное воздействие крупномасштабных процессов на структуру полей давления, ветра, термические условия и характеристики МВТ в регионе.

С 1990-х гг. интенсификация в северной части Тихого океана субарктического циклонического круговорота, описываемая индексом  $NPGO$  [40], влияет на систему течений Куроиси – Ойяиси и изменяет градиенты ТПО. Динамика круговорота определяется несколькими ключевыми факторами: изменчивостью положения и выраженности центров действия атмосферы, колебаниями приземного давления в северной части Тихого океана и связанными с ними изменениями в ветровом режиме. Это вызывает аномальное потепление в северо-западном секторе за счет адвекции теплых вод и ослабления вертикального перемешивания, что способствует формированию морских волн тепла

преимущественно в северном и центральном районах. Долгосрочные изменения *PDO* и *IPO* оказывают значительное воздействие на перенос тепла между экваториальными и умеренными широтами через океанические и атмосферные телесвязи. В свои отрицательные фазы эти индексы усиливают антициклонические условия над северо-западной частью Тихого океана, создавая обстановку, благоприятную для формирования волн тепла [39, 40].

### Заключение

Определены характеристики и тенденции межгодовой изменчивости ТПО и параметров морских волн тепла в трех выделенных районах, расположенных в различных широтных поясах на акватории северо-западной части Тихого океана. Проведен анализ причинно-следственных связей между характеристиками МВТ и крупномасштабными, а также региональными процессами в океане и атмосфере за последние два десятилетия. Получены следующие результаты.

1. Для исследуемого района в целом характерны устойчивые положительные линейные тренды межгодовых изменений температуры морской поверхности, статистически значимые на всей территории. Среднее значение тренда годовой ТПО по региону составляет  $\sim 0,5$  °C/10 лет, при этом оно возрастает с юга на север – от  $0,3$  °C/10 лет в южной части до  $2$  °C/10 лет в западной части северного сектора. Межгодовые колебания ТПО в выделенных районах происходят с периодичностью 2–5 лет и связаны с изменениями климатического индекса *NINO.W*.

2. На фоне межгодовых и сезонных изменений температурного режима на исследуемой акватории океана с начала 1980-х гг. ежегодно начали проявляться короткие периоды экстремальных положительных аномалий ТПО, классифицируемые как морские волны тепла, которые постепенно занимали все большую площадь выделенных районов. К 2020 г. этими событиями была охвачена вся акватория региона.

3. Среднегодовая частота проявлений МВТ в узлах расчетной сетки по всей исследуемой акватории составляла  $\sim 3$  события/год, при этом наблюдался ее рост на 1,8 события за десятилетие.

4. Средняя продолжительность отдельных событий МВТ по всему региону составляла  $\sim 14$  дней, изменяясь в северном, центральном и южном районах в межгодовом ходе от  $\sim 12$  до 18 дней со средним для всей акватории трендом 5,9 дня/10 лет.

5. Наибольшие пространственно усредненные значения всех трех метрик интенсивности (средней, максимальной и кумулятивной), а также соответствующих трендов характерны для северного района, что согласуется с данными других исследований. Именно здесь, у восточного тихоокеанского побережья Японии, в 2021 г. произошли наиболее мощные, длительные и масштабные события МВТ и вредоносного «цветения» водорослей, повлекшие катастрофические последствия для морских экосистем и ключевых отраслей экономики региона.

6. Максимальная частота проявлений МВТ (до 5 событий/год) отмечается в районе восточного побережья о. Хонсю. Длительность отдельных аномалий изменяется в пределах 8–45 дней, при этом наибольшие значения регистрируются в северном секторе акватории.

7. Средняя и средняя максимальная интенсивность МВТ в регионе составляет 1,4 и 2,8 °С соответственно, а их максимальные значения 3,6 и 4,7 °С также отмечаются в северном районе и особенно ярко выражены в морской зоне, расположенной северо-восточнее Японии.

8. Наибольшие значения композитного индекса интенсивности отмечены в северном районе и в водах к северо-востоку от Японии, что согласуется с пространственным распределением кумулятивного индекса. Оба показателя служат ключевыми индикаторами потенциального воздействия МВТ на морские экосистемы и достигли абсолютных максимумов в период 2020–2024 гг. Рост указанных параметров, вероятно, способствовал учащению массового вредоносного «цветения» водорослей у тихоокеанского побережья о-вов Хонсю и Хоккайдо, где в рассматриваемый период температурные аномалии проявлялись наиболее интенсивно.

Корреляционные связи параметров МВТ с ведущими модами крупномасштабных процессов в океане и атмосфере – такими как Тихоокеанская декадная осцилляция, Северо-Тихоокеанская осцилляция субарктического круговорота, Междекадная тихоокеанская осцилляция, Западно-Тихоокеанский субтропический антициклон и климатический индекс *ENSO (NINO.W)* – хорошо выражены по всему региону. Корреляционный анализ указывает также на тесную ( $R > 0,7$ ) связь большинства характеристик МВТ с изменениями приземной температуры воздуха и ТПО в регионе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Global, Multiproduct Analysis of Coastal Marine Heatwaves: Distribution, Characteristics, and Long-Term Trends / M. Marin [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2021. Vol. 126, iss. 2. e2020JC016708. EDN BZBGDY. <https://doi.org/10.1029/2020JC016708>
2. A hierarchical approach to defining marine heatwaves / A. J. Hobday [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2016. Vol. 141. P. 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
3. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century / E. C. J. Oliver [et al.] // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. 1324. EDN CYBCEJ. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>
4. Large potential impacts of marine heatwaves on ecosystem functioning / V. G. de Luzinais [et al.] // *Global Change Biology*. 2024. Vol. 30, iss. 7. e17437. EDN GSJIW. <https://doi.org/10.1111/gcb.17437>
5. Marine Heatwaves / E. C. J. Oliver [et al.] // *Annual Review of Marine Science*. 2021. Vol. 13. P. 313–342. EDN XZVROR. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032720-095144>
6. Scale-Dependent Drivers of Marine Heatwaves Globally / C. Bian [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51, iss. 3. e2023GL107306. EDN TEGVMD. <https://doi.org/10.1029/2023gl107306>
7. The Atmospheric Bridge: The Influence of ENSO Teleconnections on Air-Sea Interaction over the Global Oceans / M. A. Alexander [et al.] // *Journal of Climate*. 2002. Vol. 15, iss. 16. P. 2205–2231. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2)
8. Local Drivers of Marine Heatwaves: A Global Analysis With an Earth System Model / L. Vogt [et al.] // *Frontiers in Climate*. 2022. Vol. 4. 847995. EDN PJKKFP. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.847995>
9. Categorizing and Naming Marine Heatwaves / A. J. Hobday [et al.] // *Oceanography*. 2018. Vol. 31, iss. 2. P. 162–173. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.205>
10. Frölicher T. L., Fischer E. M., Gruber N. Marine heatwaves under global warming // *Nature*. 2018. Vol. 560. P. 360–364. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9>

11. Response of the ocean mixed layer depth to global warming and its impact on primary production: a case for the North Pacific Ocean / C. J. Jang [et al.] // *ICES Journal of Marine Science*. 2011. Vol. 68, iss. 6. P. 996–1007. EDN OLYRML. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsr064>
12. Marine Heatwaves/Cold-Spells Associated with Mixed Layer Depth Variation Globally / W. Sun [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51, iss. 24. e2024GL112325. EDN AZWFRE. <https://doi.org/10.1029/2024GL112325>
13. Marine Heatwaves in the East Asian Marginal Seas Facilitated by Boreal Summer Intraseasonal Oscillations / P. Dasgupta [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2024. Vol. 129, iss. 2. e2023JC020602. EDN BDHTZM. <https://doi.org/10.1029/2023JC020602>
14. Accelerated warming in the North Pacific since 2013 / Z.-Z. Hu [et al.] // *Nature Climate Change*. 2024. Vol. 14, iss. 9. P. 929–931. EDN ATINIX. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02088-x>
15. An unprecedented coast wide toxic algal bloom linked to anomalous ocean conditions / R. M. McCabe [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43, iss. 19. P. 10366–10376. <https://doi.org/10.1002/2016GL070023>
16. Global impacts of marine heatwaves on coastal foundation species / K. E. Smith [et al.] // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, iss. 1. 5052. EDN JTBMHF. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49307-9>
17. Biological Impacts of the 2013–2015 Warm-Water Anomaly in the Northeast Pacific. Winners, Losers, and the Future / L. M. Cavole [et al.] // *Oceanography*. 2016. Vol. 29, iss. 2. P. 273–285. EDN JTBMHF. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2016.32>
18. Understanding the compound marine heatwave and low-chlorophyll extremes in the western Pacific Ocean / Q. Chen [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2023. Vol. 10. 1303663. EDN BKFZHZ. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1303663>
19. Ocean Biogeochemical Signatures of the North Pacific Blob / S. C. Mogen [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49, iss. 9. e2021GL096938. EDN SOOYIA. <https://doi.org/10.1029/2021GL096938>
20. Climate impacts on global hot spots of marine biodiversity / F. Ramirez [et al.] // *Science Advances*. 2017. Vol. 3, iss. 2. e1601198. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601198>
21. Drivers of Marine Heatwaves in the East China Sea and the South Yellow Sea in Three Consecutive Summers During 2016–2018 / G. Gao [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, iss. 8. e2020JC016518. EDN RYMJCY. <https://doi.org/10.1029/2020JC016518>
22. The Northwestern Pacific Warming Record in August 2020 Occurred Under Anthropogenic Forcing / M. Hayashi [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48, iss. 1. e2020GL090956. EDN AWGTQK. <https://doi.org/10.1029/2020GL090956>
23. Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Жабин. И. А. Экстремальные явления морских волн тепла у восточного побережья полуострова Камчатка и в прилегающих районах в условиях современного глобального потепления // *Морской гидрофизический журнал*. 2025. Т. 41, № 4. С. 662–679. EDN KYTEWK. <https://doi.org/10.29039/2413-5577-2025-4-662-679>
24. Unprecedented Outbreak of Harmful Algae in Pacific Coastal Waters off Southeast Hokkaido, Japan, during Late Summer 2021 after Record-Breaking Marine Heatwaves / H. Kuroda [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 12. 1335. EDN WRWWGP. <https://doi.org/10.3390/jmse9121335>
25. The record-breaking 2022 long-lasting marine heatwaves in the East China Sea / H. Oh [et al.] // *Environmental Research Letters*. 2023. Vol. 18, iss. 6. 064015. EDN VJGGQE. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ACD267>
26. Summer Marine Heatwaves in the Kuroshio-Oyashio Extension Region / Y. Du [et al.] // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 13. 2980. EDN ROIDXN. <https://doi.org/10.3390/rs14132980>
27. Drivers and impacts of the most extreme marine heatwaves events / A. S. Gupta [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, iss. 1. 19359. EDN QMAMEQ. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75445-3>

28. The cause of an extreme sea surface warming in the midlatitude western North Pacific during 2012 summer / Z. Li [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2024. Vol. 11. 1471446. EDN GTEWYB. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1471446>
29. Assessment and Projections of Marine Heatwaves in the Northwest Pacific Based on CMIP6 Models / J. Xue [et al.] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, iss. 12. 2957. EDN ACLIYM. <https://doi.org/10.3390/rs15122957>
30. A global assessment of marine heatwaves and their drivers / N. J. Holbrook [et al.] // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10, iss. 1. 2624. EDN KVMPNE. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10206-z>
31. Marine heatwaves in the western North Pacific region: Historical characteristics and future projections / W. Sun [et al.] // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2023. Vol. 200. 104161. EDN YLMNHY. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104161>
32. *Miyama T., Minobe S., Goto H.* Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010–2016 // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 7. 576240. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576240>
33. *Kuroda H., Yokouchi K.* Interdecadal decrease in potential fishing areas for Pacific saury off the southeastern coast of Hokkaido, Japan // *Fisheries Oceanography*. 2017. Vol. 26, iss. 4. P. 439–454. <https://doi.org/10.1111/fog.12207>
34. *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>
35. Hotspots and drivers of compound marine heatwaves and low net primary production extremes / N. Le Grix [et al.] // *Biogeosciences*. 2022. Vol. 19, iss. 24. P. 5807–5835. EDN MWYFRM. <https://doi.org/10.5194/bg-19-5807-2022>
36. Variations of surface marine heatwaves in the Northwest Pacific during 1993–2019 / H. Wang [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2024. Vol. 11. 323702. EDN PLIUQM. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1323702>
37. Biological Impacts of Marine Heatwaves / K. E. Smith [et al.] // *Annual Review of Marine Science*. 2023. Vol. 15, iss. 1. P. 119–145. EDN ONNRPX. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-121437>
38. *Zhao Z., Marin M.* A MATLAB toolbox to detect and analyze marine heatwaves // *Journal of Open Source Software*. 2019. Vol. 4, iss. 33. 1124. <https://doi.org/10.21105/joss.01124>
39. Northwestern Pacific Oceanic circulation shaped by ENSO / Y.-L. Wang [et al.] // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, iss. 1. 11684. EDN TRSMWB. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62361-z>
40. *Joh Y., Di Lorenzo E.* Increasing Coupling Between NPGO and PDO Leads to Prolonged Marine Heatwaves in the Northeast Pacific // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, iss. 22. P. 11663–11671. <https://doi.org/10.1002/2017GL075930>

*Об авторах:*

**Ростов Игорь Дмитриевич**, ведущий 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, **ORCID ID: 0000-0001-5081-7279**, **SCOPUS Author ID: 6603588318**, **SPIN-код: 2329-0391**, **ResearcherID: AAG-5614-2021**, [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**, **Scopus Author ID: 36788322900**, **SPIN-код: 6818-1898**, [e\\_dmitrieva@poi.dvo.ru](mailto:e_dmitrieva@poi.dvo.ru)