

Экстремальные явления морских волн тепла у восточного побережья полуострова Камчатка и в прилегающих районах в условиях современного глобального потепления

И. Д. Ростов [✉], Е. В. Дмитриева, И. А. Жабин

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

Поступила в редакцию 09.12.2024; одобрена после рецензирования 15.01.2025;
принята к публикации 15.05.2025.

Аннотация

Цель. Определить характеристики и тенденции межгодовой изменчивости параметров морских волн тепла у восточного побережья п-ова Камчатка, а также в прилегающих районах за последние четыре десятилетия и дать анализ их причинно-следственных связей с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере в контексте глобального потепления, изучить возможную роль прибрежного ветрового апвеллинга в цепочке событий масштабной экологической катастрофы в исследуемом регионе осенью 2020 г. в условиях интенсификации морских волн тепла и вспышки вредоносного цветения водорослей – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Для анализа данных климатических массивов NOAA применялись стандартные методы идентификации изменчивости морских волн тепла и определения параметров амплитудно-частотного состава в узлах регулярной сетки. Результаты позволили детально охарактеризовать пространственно-временную изменчивость морских волн тепла в исследуемом регионе, включая частоту событий, их продолжительность, интенсивность, интегральные показатели (кумулятивную интенсивность и композитный индекс интенсивности), а также тенденции межгодовых и сезонных колебаний. Также были выявлены случаи ветрового апвеллинга глубинных вод в прибрежной зоне, который сопровождался всплеском концентрации хлорофилла *a* на поверхности океана в период вспышки вредоносного цветения водорослей.

Выводы. Морские волны тепла развивались на фоне устойчивых положительных трендов температуры поверхности океана. В последние два десятилетия на фоне глобального потепления наблюдалось значительное увеличение всех характеристик морских волн тепла. Выявлены статистически значимые корреляции между колебаниями различных параметров морских волн тепла и изменениями характеристик аномалий поля приземной температуры воздуха, геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 мбар, а также климатических индексов, указывающих на локальное и удаленное воздействие крупномасштабных атмосферных процессов. В период вспышки вредоносного цветения водорослей у Камчатского побережья, наблюдавшейся после воздействия морских волн тепла, отмечалось усиление ветрового апвеллинга в прибрежной зоне, способствующего поступлению биогенных веществ и динофлагеллят в фотический слой и увеличению их численности и концентрации хлорофилла *a*. Проведенные исследования позволили подтвердить предположение о роли экстремальных явлений морских волн тепла в цепочке событий экологической катастрофы в исследуемом регионе осенью 2020 г.

Ключевые слова: северо-западная часть Тихого океана, Камчатка, климатические изменения, морские волны тепла, апвеллинг, концентрация хлорофилла, климатические индексы, корреляционные связи

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ТОИ ДВО РАН «Отклик и потенциальное изменение прибрежных экосистем Камчатки в условиях глобальных климатических и локальных катастрофических воздействий». Регистрационный номер 124072200009-5.

Для цитирования: 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. 417–435. EDN KYTEWK.

Original article

Extreme Events of Marine Heat Waves off the Eastern Coast of Kamchatka Peninsula and in the Adjacent Areas under Conditions of Modern Global Warming

I. D. Rostov , E. V. Dmitrieva, I. A. Zhabin

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 inter-annual variability of marine heat wave parameters off the Kamchatka Peninsula eastern coast and in the adjacent areas over the past four decades, and to analyze their cause-and-effect relationships with the large-scale and regional processes in the ocean and atmosphere in the context of global warming, as well as to investigate the possible role of coastal wind upwelling in the chain of events of a large-scale environmental disaster in the study region in the fall 2020 under conditions of intensification of marine heat waves and outbreak of harmful algal blooms.

Methods and Results. Standard methods for identifying the variability of marine heat waves and for determining the amplitude-frequency parameters at the regular grid nodes were used to analyze the NOAA climate data array. The results permitted to characterize in detail the spatiotemporal variability of marine heat waves in the region under study including the frequency of events, their duration, intensity, integral indicators (cumulative intensity and composite intensity index), as well as the trends in inter-annual and seasonal variations. The cases of wind-driven upwelling of deep-sea waters in the coastal zone accompanied by a surge in chlorophyll *a* concentration on the ocean surface during the harmful algal bloom outbreak were also identified.

Conclusions. The marine heat wave events developed against the background of stable positive trends in sea surface temperature. During the last two decades of global warming, a significant increase in all the marine heat wave indicators has been observed. Statistically significant correlations are revealed between the fluctuations in various marine heat wave parameters and the changes in characteristics of anomalies of the surface air temperature field, geopotential height of the 500 mbar isobaric surface as well as climate indices indicating the local and remote influence of large-scale atmospheric processes. During the outbreak of harmful algal bloom off the Kamchatka coast observed after the marine heat waves impact, an increase in wind upwelling in the coastal zone was noted that facilitated the entry of nutrients and dinoflagellates into the photic layer, and also an increase in their numbers and chlorophyll *a* concentration. The conducted studies confirm the assumption about the role of extreme marine heat waves in the chain of events of the environmental disaster that took place in the region under study in the fall 2020.

Keywords: northwestern Pacific Ocean, Kamchatka, climate change, marine heat waves, upwelling, chlorophyll concentration, climate indices, correlations

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of theme of state assignment of POI FEB RAS “Response and potential change of coastal ecosystems of Kamchatka under conditions of global climatic and local catastrophic impacts”. Registration number is 124072200009-5.

For citation: Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V. and Zhabin, I.A., 2025. Extreme Events of Marine Heat Waves off the Eastern Coast of the Kamchatka Peninsula and in the Adjacent Areas under Conditions of Modern Global Warming. *Physical Oceanography*, 32 (4), pp. 446-463.

Введение

На фоне современных тенденций глобального потепления экстремальные климатические явления как в атмосфере, так и в океане становятся все более частыми, продолжительными и интенсивными. В океане такими считаются морские волны тепла (МВТ), которые признаны одним из самых серьезных экстремальных явлений, вызванных изменением климата [1]. Эти волны можно определить как продолжительные, дискретные, аномально теплые события, которые характеризуются длительностью, интенсивностью, скоростью эволюции и пространственной протяженностью [1, 2]. Качественно МВТ определяются [3] 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, отличающиеся для разных районов. В большинстве исследований, следуя единой методике [2], событие МВТ определяется как продолжительный аномально теплый период на поверхности океана, длящийся не менее пяти последовательных дней с температурами выше 90-го перцентиля в течение выбранного временного периода.

Возникновение МВТ может быть вызвано комбинацией локальных океанических и атмосферных процессов, таких как потоки тепла между воздухом и морем и горизонтальная адвекция. Эти процессы могут модулироваться крупномасштабной изменчивостью климата через дальние связи и взаимодействия [3, 4]. Морские волны тепла, как правило, идентифицируются с использованием температур поверхности океана (ТПО), хотя они могут распространяться и на большие глубины. Помимо экстремальных тепловых аномалий периодически наблюдаются и противоположные явления – экстремально холодные морские волны холода, показатели которых в большинстве регионов снижаются [1, 5], хотя в некоторых местах их интенсивность может увеличиваться.

На протяжении последних нескольких десятилетий МВТ наблюдаются во всех океанических бассейнах [1, 2, 4], а в будущем, в течение XXI в., их частота и интенсивность будет увеличиваться [5]. Примечательно, что за последние 40 лет средняя интенсивность МВТ в арктических окраинных морях стала сопоставимой с наблюдаемой в других регионах Мирового океана [6]. Явления МВТ могут длиться от нескольких дней до нескольких месяцев и охватывать десятки и сотни километров акватории. Они представляют собой значительную угрозу для морских экосистем, прибрежных биологических сообществ и экономики прибрежных регионов [2, 6, 7], но также могут создавать благоприятные условия для распространения инвазивных видов.

Факторы, определяющие начало и завершение отдельных явлений МВТ, разнообразны и могут изменяться в зависимости от региона, сезона и масштаба.

штаба события [4]. При этом океаническая адвекция играет ключевую роль в регулировании характеристик МВТ малого масштаба, в то время как атмосферные процессы являются основным движущим фактором для явлений МВТ более крупного масштаба. В целом с увеличением пространственного масштаба МВТ становятся менее интенсивными, реже встречаются и длятся дольше [8]. В периоды экстремального потепления наблюдается ослабление процессов вертикального перемешивания вод, усиление стратификации, что снижает поступление питательных веществ к поверхности, вызывает закисление вод и снижение до критических значений уровня растворенного кислорода [9, 10].

Основные риски, связанные с влиянием МВТ на морскую биоту [10], обусловлены нарушением естественных условий обитания и жизненного цикла гидробионтов, что происходит вследствие превышения адаптационных пределов этих организмов. Это также ведет к нарушениям пищевых цепочек, ухудшению кислородного режима и возникновению токсикологических угроз, связанных с вредоносным «цветением» водорослей (ВЦВ) [11]. Температура и поступление питательных веществ являются ключевыми факторами, контролирующими продуктивность океанов [12, 13]. Согласно проведенным исследованиям [14], в различных широтах МВТ могут как снижать концентрацию хлорофилла (показателя биомассы фитопланктона) [9], так и способствовать ее увеличению. При этом степень реакции хлорофилла на повышение температуры усиливается с ростом интенсивности, продолжительности МВТ и скорости поступления питательных веществ в верхний перемешанный слой. Однако связи между этими процессами сложны и неоднозначны.

Многочисленные исследования показали, что морские волны тепла стали причиной массовых явлений ВЦВ в различных регионах мира [15]. В последние десятилетия такие события становятся все более частыми и расширяются как по времени, так и по территории, оказывая беспрецедентное воздействие на морские экосистемы [1, 16, 17]. В ряде случаев эти явления приводили к катастрофическим последствиям для прибрежной аквакультуры и рыболовства. Так, в конце сентября – начале октября 2020 г. в акватории Авачинского залива и других районах юго-восточного побережья Камчатки произошла экологическая катастрофа, которая сопровождалась массовым развитием фитопланктона и аномальным ростом концентрации хлорофилла *a*. Эти изменения привели к появлению пены, пленок биогенных поверхностно-активных веществ на поверхности воды и массовой гибели морских гидробионтов (до 95% бентоса) [18, 19]. Исследования показали, что причиной этого явления было массовое и продолжительное «цветение» динофлагеллят вида *Karenia selliformis* [19], численность которых тесно коррелировала с концентрацией хлорофилла *a*, но не была связана с антропогенной эвтрофикацией [18, 20], характерной для акватории бухты Авача, примыкающей к Авачинскому заливу. Вредоносное «цветение» водорослей продолжалось два месяца и охватило обширную территорию более 300 × 100 км [19].

Среди вероятных факторов, способствующих этому явлению, выделяют сильные положительные аномалии температуры воды, которые можно расценивать как интенсивные морские волны тепла [15], а также поступление биогенных элементов из глубоких слоев воды вследствие ветро-волнового

перемешивания, вызванного проходом трех глубоких циклонов в период 19 сентября – 7 октября 2020 г. [21] и влиянием тайфуна *DOLPHIN*, который мог усилить эти процессы. Кроме того, рассматривалось влияние вызванного ветром апвеллинга, способствующего подъему динофлагеллят на поверхность, как возможная причина вспышки ВЦВ [19], но в ходе исследования эта гипотеза не была окончательно подтверждена. Подобные явления, связанные с массовым вредоносным «цветением» водорослей, известны под названием «красные приливы», они фиксировались в камчатских бухтах и ранее [21]. Спустя год, в сентябре – ноябре 2021 г., аналогичные события произошли на юге региона, у тихоокеанского побережья Хоккайдо, где также наблюдались случаи интенсивных МВТ [16]. В этом регионе также было зафиксировано массовое «цветение» динофлагеллят [20], которое сопровождалось гибелью морских организмов. Эти явления связывались с особенностями мезомасштабной динамики вод и усилением горизонтальных и вертикальных процессов перемешивания, которые последовали за интенсивными и обширными проявлениями МВТ в указанном районе [15]. В целом ретроспективный анализ токсических событий ВЦВ и лабораторные эксперименты подтверждают связь между резким повышением температуры воды и увеличением скорости производства токсинов [17].

При этом следует отметить, что многофакторные биологические воздействия на морские экосистемы, связанные с различными характеристиками МВТ, могут значительно различаться. Механизмы этих процессов, как и их причинно-следственные связи, пока недостаточно изучены [15, 22]. Установлено, что реакция экосистемы в значительной степени зависит от продолжительности, интенсивности и времени наступления экстремальных событий [23]. В то же время надежные данные о частоте случаев возникновения ВЦВ, а также о характеристиках МВТ у восточного побережья Камчатки, подобные тем, что имеются для Бохайского залива [16], отсутствуют. В целом в последние годы как в северо-восточной, так и в северо-западной части Тихого океана наблюдалась определенная зависимость возникновения и динамики ВЦВ от характеристик МВТ.

Выделяются несколько ключевых факторов, влияющих на развитие ВЦВ:

- более частые вспышки ВЦВ связаны с аномально теплыми термическими условиями, возникающими в результате воздействия МВТ [17, 20]. Однако в дальнейшем эти условия могут оказать негативное влияние на поддержание популяций таких водорослей, действуя как стрессор для их роста [24];

- в годы с «красными приливами» (период ВЦВ) общее количество дней с МВТ, как правило, выше, чем в годы без них. «Красные приливы» чаще возникают в районах с более высокой частотой и продолжительностью МВТ по сравнению с соседними акваториями [25];

- даже в местах, где такие водоросли встречаются редко, после вспышки ВЦВ могут возникать повторные события в последующие годы [20];

- формирование областей экстремальных температурных аномалий на поверхности океана и усиление стратификации, вызванные МВТ за месяц [15] или более до начала ВЦВ, способствуют запуску и ускорению процессов развития ВЦВ;

– вспышки ВЦВ происходят при попадании водорослей в оптимальные экологические условия [15]. Процессы ветро-волнового перемешивания, апвеллинга, горизонтальной адвекции и мезомасштабной динамики вод, приводящие к притоку питательных веществ из глубинных слоев в фотический слой, являясь необходимыми для питания фитопланктона и поддержания ВЦВ [17, 18];

– расширение зоны, охваченной ВЦВ, связано с углублением перемешанного поверхностного слоя и вовлечением биогенных веществ из речного стока [15, 18, 21] и соседних акваторий.

Морские акватории, прилегающие к восточному побережью Камчатского п-ова, являются одной из наиболее динамически активных и продуктивных областей Тихого океана, обеспечивающих необходимые условия для воспроизводства и промысла множества видов рыб и других гидробионтов. На рубеже XX–XXI вв. в исследуемом районе преобладали однонаправленные тенденции изменений термических условий в сторону увеличения температуры воды и воздуха в основном вследствие изменений теплообмена с атмосферой, что проявляется в характеристиках ледовитости, термохалинной структуры и теплосодержания вод [26]. Эти процессы характеризуются значительной пространственно-временной изменчивостью и оказывают заметное влияние на экологическое состояние и биоту региона. На акватории региона отмечалась наибольшая в пределах всего бассейна Тихого океана скорость потепления, а вклад тренда в суммарную дисперсию среднегодовой ТПО достигал 30–40% [26]. Наибольшие тренды T_a и ТПО наблюдались в западной части Берингова моря и у восточного побережья Камчатки [27]. Особенности их межгодовой изменчивости определяются поверхностным воздействием и внутренней динамикой океана. Они включают сезонные изменения, а также десятилетние и междесятилетние колебания, наложенные на монотонные тенденции в условиях изменяющихся климатических режимов и отдельных фаз глобального потепления.

На данный момент метрики явлений МВТ – количественные показатели (такие как интенсивность, продолжительность, частота, площадь охвата [2]), их статистические характеристики, а также причинно-следственные связи с процессами в атмосфере и океане в регионе северо-западной части Тихого океана у восточного побережья Камчатки остаются недостаточно изученными.

Цель данной работы – определение характеристик и тенденций межгодовой изменчивости параметров МВТ у восточного побережья Камчатки и в прилегающих районах, а также анализ причинно-следственных связей с крупномасштабными и региональными процессами в океане и атмосфере за последние 40 лет, изучение возможной роли прибрежного ветрового апвеллинга в цепочке событий масштабной экологической катастрофы в исследуемом регионе в условиях интенсификации МВТ и вспышки вредоносного «цветения» водорослей.

Данные и методы

Район исследований ограничен координатами 51–63° с. ш.; 156–180° в. д., а временной период – четырьмя десятилетиями 1982–2023 гг. В работе использованы данные оптимальной интерполяции ежедневной ТПО (NOAA-OI SST, 2) в узлах сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, доступные по адресу

<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>, и стандартный метод идентификации MBT [2]. Событие MBT определялось как аномально теплое явление на поверхности океана, длящееся не менее пяти последовательных дней (два последовательных события с перерывом менее трех дней считаются одним событием) с температурами поверхности выше 90-го перцентиля, на основе базового климатического 30-летнего периода 1988–2018 гг. с использованием программного обеспечения *Matlab* [28]. Согласно методу [2], 90-й перцентиль был рассчитан для каждого календарного дня с использованием ежедневных значений ТПО в пределах 11-дневного окна, центрированного на данных за все годы в пределах климатологического периода и сглаженного путем применения 31-дневного скользящего среднего. Для описания, сравнительного анализа и классификации характеристик MBT в каждом узле сетки и в среднем по региону были рассчитаны различные метрики [2], определяемые на основе степени, в которой значения фактической температуры превышают местные климатические характеристики 90-го перцентиля базового периода [22]:

- частота – количество событий MBT в год (F);
- продолжительность – количество дней между началом и окончанием периода явления MBT, когда ТПО превышает порог 90% (D , сут);
- интенсивность MBT – отклонение среднесуточной ТПО относительно 90-го перцентиля базового периода в выбранный день (I , °C);
- средняя интенсивность, представляет собой среднюю интенсивность (температурную аномалию) для всего рассматриваемого события MBT (I_{mean} , °C);
- максимальная интенсивность – наибольшая аномалия температуры относительно аномалии температуры климатических характеристик в период события MBT (I_{max} , °C);
- кумулятивная интенсивность – показатель, суммирующий значения температурных аномалий в течение события MBT (I_{cum} , °C);
- композитный индекс интенсивности, который интегрирует частоту (количество) событий, их интенсивность и длительность на протяжении всего периода (ICI , °C·сут).

Использовались также данные реанализа полей приземной температуры воздуха (T_a), давления, ветра и ряды климатических индексов (КИ) [26, 29]: *AMO*, *NPGO*, *PDO*, *SOI*, *WP*, *NINO.WEST*, полученные с сайтов NOAA <https://psl.noaa.gov/data/gridded/index.html> и <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>. Спутниковые данные о концентрации хлорофилла *a* и ТПО с высоким разрешением были взяты с сервера *ERDDAP NOAA CoastWatch* на сайте <https://coastwatch.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000>.

Проводился статистический расчет и анализ пространственно-временной изменчивости характеристик используемых данных по единой методике [29]. С учетом продолжительности летнего и зимнего муссонов и внутригодового хода T_a и ТПО были выбраны условно теплый, летний (июнь – сентябрь), и условно холодный, зимний (ноябрь – март), сезоны (периоды) года. Расчеты проводились как для всего 42-летнего периода 1982–2023 гг., так и для его первой (1982–2002) и второй (2003–2023) половин. Уровень значимости 95% для трендов временных рядов и коэффициентов корреляции оценивался по критерию Стьюдента с использованием эффективных степеней свободы.

Для изучения возможности проявления и характеристик сезонного прибрежного апвеллинга в исследуемом районе использовался ветровой индекс апвеллинга, позволяющий получить количественные оценки направленного от берега экмановского переноса вод в поверхностном слое трения [30]. Индекс рассчитывается по полю ветра в прибрежных районах океана с использованием данных, полученных при помощи спутниковых скаттерометров, которые отражают короткопериодную изменчивость поля ветра [31]. Для прибрежных районов юго-восточного побережья Камчатки и Авачинского залива уравнение для расчета ветрового индекса апвеллинга можно представить в следующем виде:

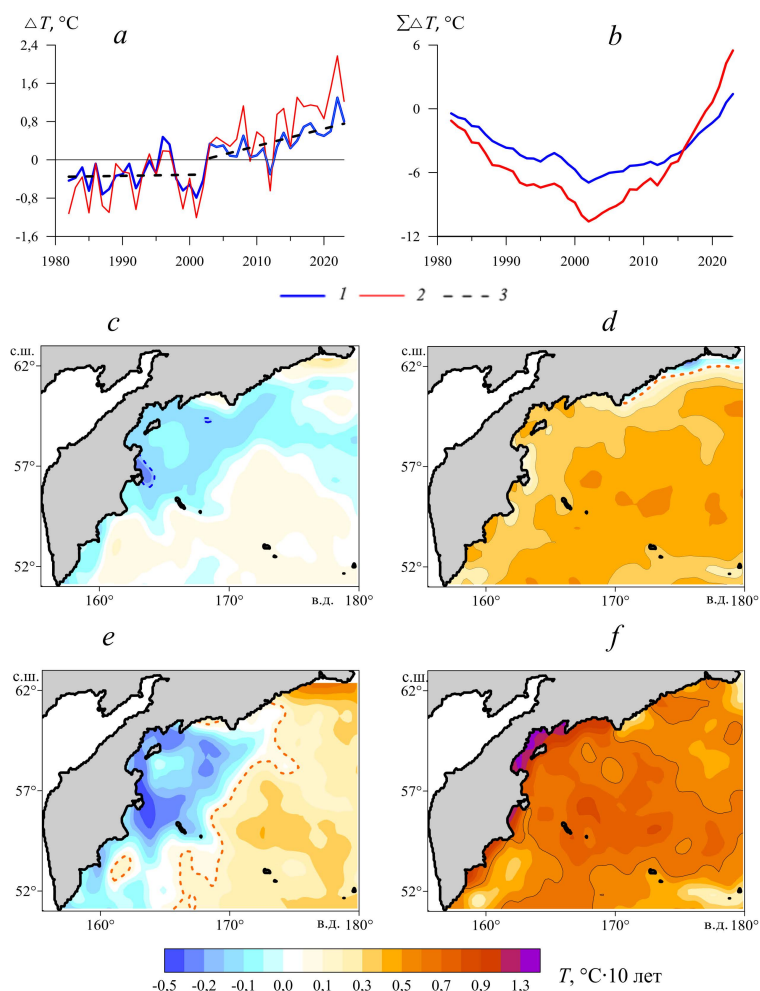
$$UI = -Q_x \sin(a - \pi/2) + Q_y \cos(a - \pi/2),$$

где a – угол между соответствующей параллелью и прямой, аппроксимирующей среднюю береговую линию; Q_x и Q_y – значения зональной и меридиональной составляющих ветрового переноса. В этом случае $Q_x = \tau_y/\rho f$, $Q_y = -\tau_x/\rho f$, где τ_x и τ_y – значения зональной и меридиональной составляющих касательного напряжения ветра, ρ – плотность морской воды ($1025 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$), f – параметр Кориолиса. Касательное напряжение ветра рассчитывалось по уравнениям, предложенным в работе [32].

Тенденции потепления на акватории восточного побережья п-ова Камчатка и прилегающих районов

В целом по району в период 1982–2023 гг. отмечался статистически значимый положительный тренд аномалий среднегодовой ТПО (ΔT), составляющий $0,31^\circ\text{C}$ за 10 лет. В графиках аномалий и накопленных аномалий выделяются две фазы (периода) климатических изменений: 1982–2002 гг., когда преобладали отрицательные аномалии ТПО, и 2003–2023 гг. – с преобладанием положительных аномалий (рис. 1, а, б).

Значение тренда среднегодовой ТПО в первой фазе составляло $0,02^\circ\text{C}$ за 10 лет и не являлось статистически значимым, тогда как во второй фазе оно увеличилось до значимого $0,36^\circ\text{C}$ за 10 лет. В теплый период года во время первой фазы (1982–2002) по всему району наблюдалось умеренное увеличение ТПО до $0,12^\circ\text{C}$ за 10 лет. Однако в последующий период (2003–2023) тренд ТПО резко усилился, достигнув $0,64^\circ\text{C}$ за 10 лет. Это связано с переходом к новому климатическому режиму и изменением характеристик атмосферной циркуляции в регионе. Причем, как было показано ранее [26], в северном и южном секторах акватории всей внетропической зоны северо-западной части Тихого океана выявленные тенденции также различаются. Как видно из рис. 1, с – ф, в последние два десятилетия знак тренда ТПО на акватории западной и северо-западной областей исследуемого района изменился с отрицательного на положительный. При этом в теплый период года у побережья восточной части п-ова Камчатка сформировалась полоса с экстремальными трендами ТПО (рис. 1, ф), которые, по нашим оценкам, достигли рекордных значений для всего бассейна Тихого океана – до $1,45^\circ\text{C}$ за 10 лет.



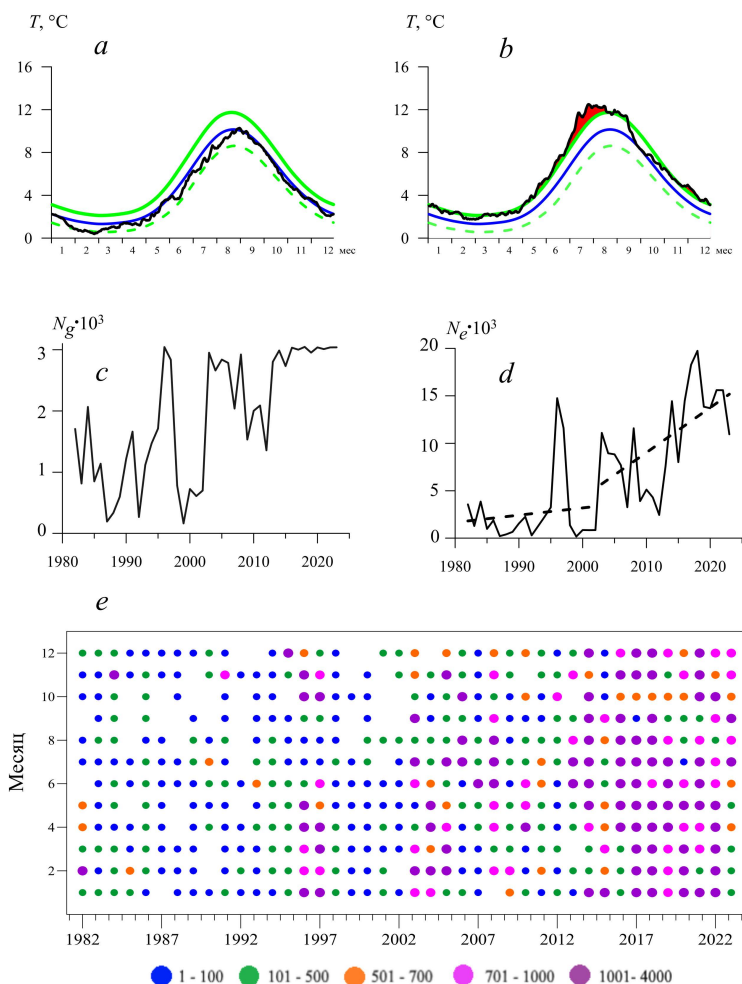
Р и с. 1. Межгодовая изменчивость аномалий среднегодовой ТПО (ΔT) (a) и накопленных аномалий ($\Sigma \Delta T$) (b) в 1982–2023 гг.; тренды аномалий среднегодовой ТПО (c) и аномалий ТПО за теплый период (e) в 1982–2002 гг.; то же – в 2003–2023 гг. (d, f). Обозначения на фрагментах a, b: 1 – среднегодовые аномалии ТПО; 2 – аномалии ТПО за теплый период; 3 – линейные тренды за два периода; штриховыми линиями на фрагментах c, d, e ограничены области, статистически значимые на уровне 95%

F i g. 1. Inter-annual variability of annual average SST (ΔT) anomalies (a) and accumulated ($\Sigma \Delta T$) anomalies (b) in 1982–2023; trends of annual average SST anomalies (c) and warm period SST anomalies (e) in 1982–2002; the same is for 2003–2023 (d, f). Legend at the fragments a and b: 1 – annual average SST anomalies; 2 – warm period SST anomalies; 3 – linear trends for two periods; dashed lines delimit the areas statistically significant at the 95% level in fragments c, d and e

Средние показатели характеристик морских волн тепла

На рис. 2 показаны временные изменения некоторых характеристик МВТ по всему району. Из рисунка следует, что в последние 40 лет наблюдалось постепенное увеличение площади акватории (количества узлов сетки, N_g , – рис. 2, c), охваченной этим процессом. Эти события фиксируются в течение всех месяцев года, однако в середине периода наблюдался резкий рост их числа (рис. 2, d, e). В целом суммарное количество событий МВТ (N_e) в узлах сетки за этот период увеличилось с 213 в 1987 г. до 19,7 тыс. в 2018 г.

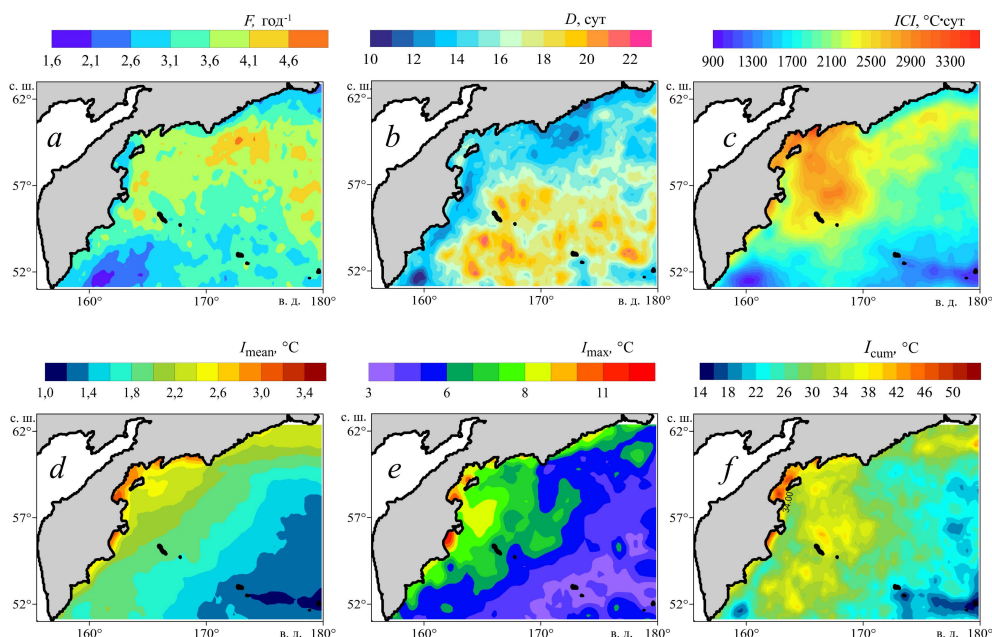
(в среднем за период наблюдалось $\sim 6,5$ тыс. событий в год) со значимым трендом $\sim 3,5$ тыс. за 10 лет. Амплитудно-частотные характеристики внутри-годовой динамики этих событий по району также различаются и в зависимости от года имеют специфические особенности для каждого периода (рис. 2, *a*, *b*). В межгодовом ходе кривой N_e прослеживаются общие тенденции потепления в регионе и два основных периода, которые отражают ключевые изменения климата (рис 1, *a*; 2, *d*).



Р и с. 2. Общие показатели событий МВТ по району исследований. Изменения в 2002 г. (*a*) и в 2023 г. (*b*) среднесуточных ТПО (черная кривая), климатологических средних ТПО (синяя кривая), пороговых значений 90-го перцентиля (сплошная зеленая кривая) и 10-го перцентиля (штриховая зеленая кривая); количество узлов сетки N_g (*c*), в которых наблюдались события МВТ, и количество событий МВТ N_e в узлах сетки (*d*); дифференцированные изменения количества событий МВТ по всему району за различные годы по месяцам (*e*)

F i g. 2. General indicators of MHW events in the region under study. Changes of daily average SST (black curve), climatological average SST (blue curve), and the 90th (solid green curve) and 10th (dashed green curve) percentile thresholds in 2002 (*a*) and 2023 (*b*); number of grid nodes N_g (*c*), where the MHW events were observed, and a number of MHW events N_e at the grid nodes (*d*); differentiated changes in the number of MHW events over the entire region for different years by months (*e*)

Основные пики на этой кривой соответствуют пиковым значениям Эль-Ниньо, которые происходили в последние десятилетия, а общий тренд совпадает с глобальными климатическими изменениями [1, 29, 33]. Дальнейший анализ характеристик МВТ в регионе был сосредоточен на последнем 20-летнем временном интервале (2003–2023). Рисунок 3 иллюстрирует частоту событий, их продолжительность, интенсивность и интегральные показатели, подчеркивая значительные региональные различия в этих показателях за последние два десятилетия.



Р и с. 3. Пространственное распределение многолетних усредненных среднегодовых характеристик МВТ в 2003–2023 гг.: частота событий МВТ (а); продолжительность (b); композитный индекс интенсивности (с); средняя интенсивность (d); максимальная интенсивность (e); кумулятивная интенсивность (f)

F i g. 3. Spatial distribution of long-term averaged annual mean MHW characteristics in 2003–2023: MHW events frequency (a); duration (b); composite intensity index (c); mean (d), maximum (e) and cumulative (f) intensities

Зона с минимальной частотой событий МВТ (менее двух в год) расположена к юго-востоку от Камчатки в океанской части, а максимальная частота (более четырех в год) наблюдалась вблизи кромки шельфа Берингова моря (рис. 3, a), что также отмечалось ранее [34]. Среднее значение частоты событий (F) составило 3,4 в год. Средняя продолжительность каждого события МВТ (D) в водах региона равнялась 16 сут. В то же время с удалением от континента продолжительность этих событий увеличивается с 10–12 дней на северо-западе до 20–25 дней в глубоководных районах юго-восточной части региона (рис. 3, b).

Средняя и средняя из максимальных интенсивности МВТ в исследуемом районе за 20 лет составили 1,8 и 5,2 °C соответственно, а средняя кумулятивная интенсивность – 28,2 °C. Наибольшие значения этих характеристик

($I_{\text{mean}} \sim 3,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $I_{\text{max}} \sim 11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $I_{\text{cum}} \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$) отмечались в узкой прибрежной зоне северо-восточной части Камчатского п-ова и прилегающих к континенту акваториях океана (рис. 3, *d – f*). Композитный индекс интенсивности (*ICI*), объединяющий три основные переменные MBT (*F*, *D*, I_{mean}), предоставляет более полную картину проявления MBT. Пространственное распределение *ICI* (рис. 3, *c*) демонстрирует более высокие значения индекса в западной части бассейна Берингова моря, в то время как в южной части региона наблюдаются его относительно низкие значения.

Эти общие тенденции в динамике суточных характеристик MBT, с одной стороны, являются ожидаемым следствием повышения средней температуры поверхности океана в условиях глобального потепления [33], с другой – отражают избирательную чувствительность к изменениям температуры морской поверхности и могут быть как предвестниками, так и причиной формирования межгодовых трендов температурных колебаний [34].

Межгодовые и сезонные изменения MBT

На рис. 4 показаны межгодовые изменения основных характеристик MBT, усредненных по всему исследуемому району. Временной ход показателей MBT характеризуется наличием пиковых значений в конце периода 1982–2023 гг. При этом наблюдается заметный положительный линейный тренд (рис. 4, таблица). Связи между изменениями характеристик MBT, аномалиями различных региональных климатических показателей и климатических индексов демонстрируют относительно тесную корреляцию.

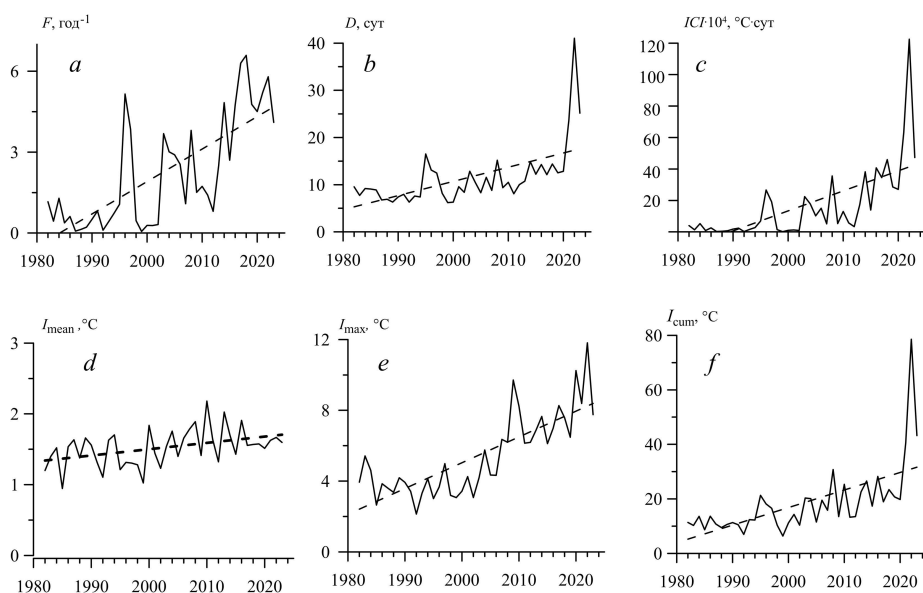


Рис. 4. Регионально усредненные среднегодовые значения частоты *F* (*a*), продолжительности *D* (*b*), композитного индекса интенсивности *ICI* (*c*), средней I_{mean} (*d*), максимальной I_{max} (*e*) и кумулятивной I_{cum} (*f*) интенсивности событий MBT за период 1982–2023 гг. Обозначения: сплошная линия – показатель MBT, штриховая – линейный тренд

Fig. 4. Regionally averaged annual mean values of frequency *F* (*a*), duration *D* (*b*), composite intensity index *ICI* (*c*), mean I_{mean} (*d*), maximum I_{max} (*e*) and cumulative I_{cum} (*f*) intensities of MHW events for 1982–2023. Legend: solid line denotes MHW index, dashed line – linear trend

Значения межгодовых трендов ($b/10$ лет) среднегодовых показателей MBT и коэффициенты корреляции (R) событий MBT с климатическими параметрами за 1982–2023 гг.

Inter-annual trend ($b/10$ years) values of annual average MHW indicators, and correlation coefficients (R) of MHW events with climatic parameters for 1982–2023

Параметры/ Parameters	F	D	ICI	I_{mean}	I_{max}	I_{cum}
b	1,2	3,7	12,5×10³	0,1	1,5	6,4
R/SST_a	0,81	0,57	0,76	0,33	0,55	0,59
R/T_a	0,76	0,63	0,74	0,36	0,52	0,65
R/H_{500}	0,52	0,47	0,51	0,38	0,57	0,53
R/AMO	0,35	0,53	0,38	0,44	0,50	0,44
R/SOI	0,22	0,36	0,32	0,29	0,38	0,42
$R/NINO.W$	0,61	0,45	0,57	0,39	0,69	0,52
$R/NPGO$	–0,47	–0,31	–0,35	0,12	–0,19	–0,22
R/IPO	–0,21	–0,38	–0,40	–0,23	–0,38	–0,42

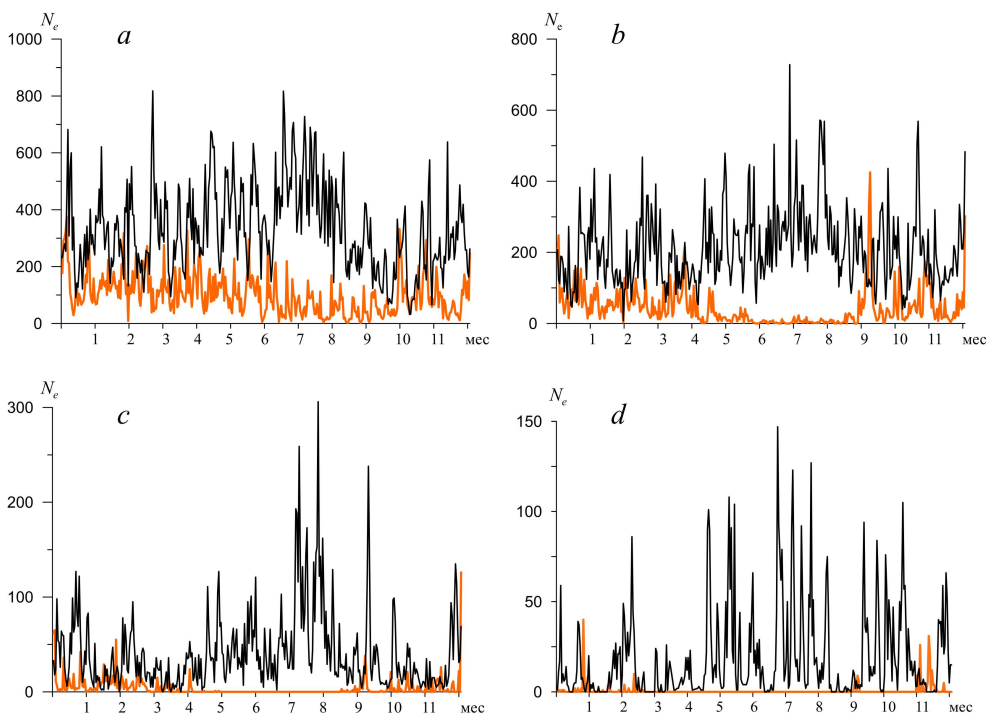
Примечание. SST_a – среднегодовые аномалии приземной температуры воздуха по данным реанализа; T_a – среднегодовые аномалии температуры воздуха на прибрежной метеостанции Апука (Олюторка) с сайта <http://portal.esimo.ru/portal>; H_{500} – аномалии геопотенциальной высоты поверхности 500 мбар; AMO – IPO – климатические индексы [26, 29]. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые (95%) оценки

Note. SST_a is annual average anomalies of surface air temperature based on reanalysis data; T_a is annual average anomalies of air temperature at the coastal weather station Apuka (Olyutorka) taken from the website <http://portal.esimo.ru/portal>; H_{500} – anomalies of geopotential height of the 500 mbar surface; AMO – IPO are climatic indices [26, 29]. Statistically significant (95%) estimates are highlighted in bold

Тенденции изменений показателей MBT по всему району характеризуются следующими особенностями. Количество событий MBT в год увеличивается на 1,2 за 10 лет (таблица). Средняя продолжительность каждого события увеличивалась на 3,7 дня за десятилетие и в 2022 г. достигала рекордных 49 дней (рис. 4, b). Это объясняет наличие пиков в распределении кумулятивной интенсивности (рис. 4, f) и композитного индекса MBT за указанный год (рис. 4, c). В среднем наибольшие аномалии температуры воды относительно климатических характеристик увеличивались на 1,5 °C за декаду (таблица), что согласуется с результатами других исследований [33]. Зависимость продолжительности событий MBT от их частоты и максимальной интенсивности характеризуется высокой корреляцией ($R = 0,6$).

Данные таблицы показывают наличие средних статистически значимых корреляционных связей межгодовых колебаний различных показателей MBT с изменениями характеристик аномалий температуры воздуха у поверхности – (в целом по району ($R = 0,61$), аномалий T_a на ближайшей прибрежной метеостанции ($R = 0,61$), высоты геопотенциала на уровне 500 мбар ($R = 0,50$)), а также с различными климатическими индексами. Тенденции межгодовых изменений климатических индексов определяются главным образом положением, выраженностью и взаимодействием основных барических образований, являющихся сезонными центрами действия атмосферы, и зависят от

выбранного периода времени. Корреляционные связи колебаний климатических индексов АМО – IPO отражают воздействие различных крупномасштабных процессов, которые являются частью режима изменчивости климата в глобальном масштабе, на структуру полей давления, ветра и термические условия в субарктическом регионе через дальние связи [26].



Р и с. 5. Количество событий МВТ (N_e) различной продолжительности за 1982–2002 гг. (оранжевая кривая) и 2003–2023 гг. (черная кривая), осредненных для всего района за различные дни и сезоны года: 5–10 дней в год (a), 11–32 дня (b), 33–62 дня (c) и более 62 дней (d)

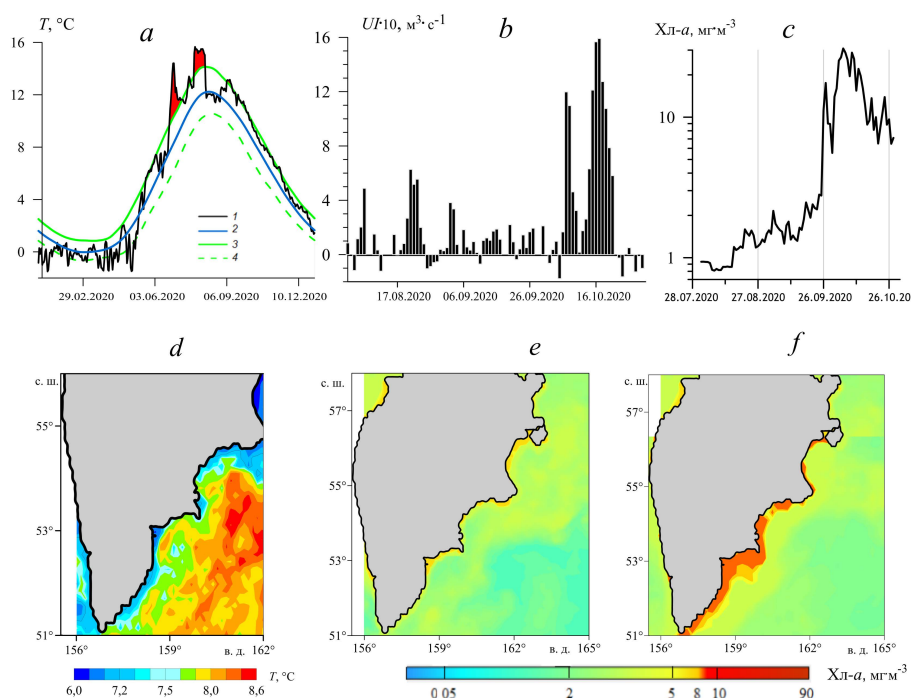
F i g. 5. Number of MHW events (N_e) of different durations for 1982–2002 (orange curve) and 2003–2023 (black curve) averaged for the entire region for different days and seasons of a year: 5–10 days per year (a), 11–32 days (b), 33–62 days (c), and more than 62 days (d)

Как видно из рис. 5, в среднем за 2003–2023 гг. максимальное количество событий МВТ за отдельные дни в узлах сетки региона соответствует событиям малой продолжительности (5–10 дней в год) (рис. 5, a). Наибольшее количество событий различной продолжительности наблюдается в теплый период года. Во внутригодовой динамике общее количество событий МВТ, усредненное по району, резко увеличивается на второй фазе исследуемого периода (рис. 5, a – d).

Таким образом, локальные атмосферные воздействия являются ключевым фактором изменчивости МВТ в исследуемом регионе. Эти воздействия могут модифицироваться крупномасштабными климатическими режимами изменчивости.

Морские волны тепла и вспышка вредоносного «цветения» водорослей у побережья Камчатки в 2020 г.

Как отмечалось выше, в последние два десятилетия на исследуемой акватории наблюдается тенденция к ускоренному потеплению, а явления морских волн тепла охватили всю акваторию региона (рис. 1–4). К концу этого периода экстремальные воздействия МВТ и аномально высоких температур на биоту прибрежной зоны и прилегающих морских районов достигли наибольшей интенсивности. В условиях экологической катастрофы Камчатки в конце сентября – начале октября 2020 г. эти процессы сопровождалась массовым развитием микроводорослей и значительным ростом концентрации хлорофилла *a* [18, 19, 21], что, по-видимому, стало одним из факторов, способствующих вспышке ВЦВ. В числе причин этого явления также рассматривались процессы перемешивания в верхнем слое океана, которые способствуют поступлению биогенных веществ и динофлагеллят в фотический слой [18, 19, 21]. Одним из таких процессов был прибрежный апвеллинг – подъем глубинных вод к поверхности, вызванный воздействием ветра.



Р и с. 6. Изменения в исследуемом районе в сезонном ходе температуры у побережья зал. Авача в 2020 г. (а): среднесуточных ТПО (1), климатологических средних ТПО (2), пороговых значений 90-го процентилля (3) и 10-го процентилля (4); временная изменчивость ежедневных значений индекса апвеллинга в том же районе летом – осенью 2020 г. (b); внутригодовая изменчивость концентрации хлорофилла *a* на поверхности у побережья зал. Авача в августе – октябре 2020 г. (c); ТПО за 28.10.2020 г. (d); распределение концентрации хлорофилла *a* на поверхности океана 15.08.2020 г. (e) и 15.10.2020 г. (f)

F i g. 6. Changes in daily average SST (1), climatological average SST (2), and the 90th (3) and 10th (4) percentile threshold values in temperature seasonal variation in the study area off the coast of Avacha Bay in 2020 (a); temporal variability of daily upwelling index values in the same area in summer – fall, 2020 (b); intra-annual variability of surface chlorophyll *a* concentration off the coast of Avacha Bay in August – October, 2020 (c); SST for 10.28.2020 (d); distribution of chlorophyll *a* concentration on the ocean surface on 08.15.2020 (e) and 10.15.2020 (f)

Следует отметить, что влияние ветрового апвеллинга на термическую структуру вод у восточного побережья Камчатского п-ова в период резкого ухудшения экологической ситуации в сентябре – октябре 2020 г. ранее не изучалось. Для анализа этого процесса можно использовать спутниковые карты распределения ТПО (на которых зоны апвеллинга выделяются как области более холодных вод у побережья), а также результаты расчета ветрового индекса апвеллинга (рис. 6, *b, d*).

Ветровой индекс апвеллинга применяется для оценки интенсивности прибрежного подъема вод. Положительные значения индекса указывают на апвеллинг, отрицательные – на даунвеллинг (опускание вод). Наши расчеты показали, что в летне-осенний период, когда в прибрежной полосе и над акваторией региона преобладают западные и юго-западные ветры со средней скоростью $4\text{--}9\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ [27], могут формироваться благоприятные условия для развития прибрежного сезонного апвеллинга. Максимальные положительные значения индекса апвеллинга в полосе широт $52\text{--}53^\circ\text{ с. ш.}$ прибрежной зоны Камчатки (рис. 6, *b*), указывающие на интенсивный апвеллинг, наблюдаются осенью, после весенне-летних событий МВТ (рис. 6, *a*). Эти события сопровождаются формированием пояса более холодных вод в прибрежной зоне (рис. 6, *d*), а также резким увеличением концентрации хлорофилла *a* во внутригодовом ходе (рис. 6, *c*) и изменением ее пространственного распределения (рис. 6, *f*) по сравнению с периодом, когда ветровой апвеллинг не был выражен (рис. 6, *e*). Следует отметить, что помимо воздействия на биоту токсинов, вызывающих гибель морских организмов при вспышке ВЦВ, другим негативным фактором является снижение уровня растворенного кислорода в придонных слоях до критических значений [11] в процессе гибели и разложения биомассы микроводорослей. В контексте камчатской экологической катастрофы подобные случаи гипоксии оказались недостаточно исследованными.

Заключение

1. В 1982–2023 гг. экстремальные явления морских волн тепла развивались и усиливались на фоне положительных трендов температуры поверхности океана. В течение первой 20-летней фазы (1982–2002) линейные тренды межгодовых изменений ТПО и различных показателей МВТ были малы и статистически не значимы. На второй фазе (2003–2023) межгодовые изменения этих характеристик демонстрируют значительные положительные тренды, что подтверждает устойчивое усиление явлений МВТ с точки зрения частоты событий, их продолжительности, интенсивности и интегральных показателей, подчеркивая значительные региональные различия в этих показателях за последние десятилетия.

2. Количество событий МВТ увеличивалось с 213 в 1987 г. до 19,7 тыс. в 2018 г., что соответствует значительному тренду в 3,5 тыс. событий за 10 лет. В среднем за год в регионе происходило $\sim 6,5$ тыс. таких событий с пиками, совпадающими с фазами Эль-Ниньо. Максимальное количество событий МВТ за отдельные дни соответствовало малой длительности (5–10 дней в год). Средняя частота событий МВТ составила 3,4 в год, а средняя продолжительность каждого события – 16 дней. В 2003–2023 гг. наибольшие

значения различных показателей МВТ фиксировались в узкой прибрежной зоне северо-восточной Камчатки и прилегающих акваториях.

3. Выявлены статистически значимые корреляции между колебаниями различных показателей МВТ и изменениями характеристик аномалий приземной температуры воздуха, высоты геопотенциала изобарической поверхности 500 мбар, а также климатических индексов (AMO, NINO.WEST, NPGO, IPO), что указывает на воздействие аномалий поля температуры воздуха и крупномасштабных атмосферных процессов на развитие МВТ.

4. В период вспышки вредоносного «цветения» водорослей у Камчатского побережья наблюдалось усиление ветрового апвеллинга в прибрежной зоне, способствующего поступлению биогенных веществ и динофлагеллят в фотический слой. Проведенные исследования подтверждают предположения о роли апвеллинга как важного причинного фактора в цепочке событий экологической катастрофы в исследуемом регионе осенью 2020 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. State of the Global Climate 2023. World Meteorological Organization. WMO-No. 1347. Geneva : WMO, 2024. 47 p.
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.poccean.2015.12.014>
3. Marine Heatwaves / E. C. J. Oliver [et al.] // *Annual Review of Marine Science*. 2021. Vol. 13, iss. 1. P. 313–342. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032720-095144>
4. Local Drivers of Marine Heatwaves: A Global Analysis With an Earth System Model / L. Vogt [et al.] // *Frontiers in Climate*. 2022. Vol. 4. 847995. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.847995>
5. Yao Y., Wang C., Fu Y. Global Marine Heatwaves and Cold-Spells in Present Climate to Future Projections // *Earth's Future*. 2022. Vol. 10, iss. 11. e2022EF002787. <https://doi.org/10.1029/2022EF002787>
6. Arctic Amplification of marine heatwaves under global warming / Y. He [et al.] // *Nature Communication*. 2024. Vol. 15. 8265. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52760-1>
7. Marine heatwaves as drivers of biological and ecological change: implications of current research patterns and future opportunities / P. W. S. Joyce [et al.] // *Marine Biology*. 2024. Vol. 171. 20. <https://doi.org/10.1007/s00227-023-04340-y>
8. Scale-Dependent Drivers of Marine Heatwaves Globally / C. Bian [et al.] // *Geophysical Research Letter*. 2024. Vol. 51, iss. 3. e2023GL107306. <https://doi.org/10.1029/2023gl107306>
9. 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. <https://doi.org/10.5194/bg-19-5807-2022>
10. Frölicher T. L., Laufkötter C. Emerging risks from marine heat waves // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9, iss. 1. 650. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03163-6>
11. Marine harmful algal blooms (HABs) in the United States: History, current status and future trends / D. M. Anderson [et al.] // *Harmful Algae*. 2021. Vol. 102. 101975. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.101975>
12. Falkowski P. G., Oliver M. G. Mix and match: how climate selects phytoplankton // *Nature Reviews: Microbiology*. 2007. Vol. 5, iss. 10. P. 813–819. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1751>
13. Marine heatwaves during the pre-monsoon season and their impact on Chlorophyll-a in the north Indian Ocean in 1982–2021 / M. S. Krishnapriya [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 197. 115783. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115783>

14. Noh K. M., Lim H.-G., Kug J.-S. Global chlorophyll responses to marine heatwaves in satellite ocean color // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17, iss. 6. 064034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac70ec>
15. Unprecedented Outbreak of Harmful Algae in Pacific Coastal Waters of 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. <https://doi.org/10.3390/jmse9121335>
16. Temporal and spatial characteristics of harmful algal blooms in the Bohai Sea during 1952–2014 / N.-q. Song [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2016. Vol. 122. P. 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.04.006>
17. An unprecedented coastwide 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>
18. Detection and Analysis of the Causes of Intensive Harmful Algal Bloom in Kamchatka Based on Satellite Data / V. Bondur [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 10. 1092. <https://doi.org/10.3390/jmse9101092>
19. A massive bloom of *Karenia* species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020 / T. Y. Orlova [et al.] // *Harmful Algae*. 2022. Vol. 120, iss. 2. 102337. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102337>
20. Distribution of Harmful Algae (*Karenia* spp.) in October 2021 Off Southeast Hokkaido, Japan / H. Kuroda [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 841364. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.841364>
21. Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В. Особенности распределения концентрации хлорофилла *a* у восточного побережья Камчатки осенью 2020 года по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 1. С. 226–238. EDN MWSZTP. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-226-238>
22. 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>
23. Onset and Decline Rates of Marine Heatwaves: Global Trends, Seasonal Forecasts and Marine Management / C. M. Spillman [et al.] // *Frontiers in Climate*. 2021. Vol. 3. 801217. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.801217>
24. Effect of marine heatwaves on bloom formation of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*: Two sides of the same coin? / Y. K. Lim [et al.] // *Harmful Algae*. 2021. Vol. 104. 102029. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102029>
25. Marine Heatwaves in China's Marginal Seas and Adjacent Offshore Waters: Past, Present, and Future / Y. Yao [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, iss. 3. e2019JC015801. <https://doi.org/10.1029/2019JC015801>
26. 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. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-2-157-176>
27. Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Воронцов А. А. Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // *Известия ТИНРО*. 2018. Т. 193. С. 167–182. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-167-182>
28. Zhao Z., Marin M. A. MATLAB toolbox to detect and analyze marine heatwaves // *The Journal of Open Source Software*. 2019. Vol. 4, iss. 33. 1124. <https://doi.org/10.21105/joss.01124>
29. Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И. Тенденции изменений температуры воды в тропической зоне Тихого океана в 1982–2021 гг. // *Океанология*. 2023. Том 63, № 6. С. 871–885. EDN UZQZMH. <https://doi.org/10.31857/S0030157423060126>
30. Bakun A. Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling // *Science*. 1990. Vol. 247, iss. 4939. P. 198–201. <https://doi.org/10.1126/science.247.4939.198>

31. *Gonzalez-Nuevo G., Gago J., Cabanas J. M.* Upwelling index: a powerful tool for marine research in the NW Iberian upwelling system // *Journal of Operational Oceanography*. 2014. Vol. 7, iss. 1. P. 47–57. <https://doi.org/10.1080/1755876x.2014.11020152>
32. *Large W. G., Pond S.* Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, iss. 3. P. 324–336. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2)
33. A quantitative analysis of marine heatwaves in response to rising sea surface temperature / *Y. Cheng [et al.]* // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 881. 163396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163396>
34. *Carvalho K. S., Smith T. E., Wang S.* Bering Sea marine heatwaves: Patterns, trends and connections with the Arctic // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 600. 126462. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126462>

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**, 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

Жабин Игорь Анатольевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория гидрологических процессов и климата, ФГБУН ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0294-7156**, **Scopus Author ID: 6701652344**, **SPIN-код: 5881-2713**, zhabin@poi.dvo.ru