

## Сезонные аномалии термического индекса апвеллинга в восточной части Тихого океана

А. Н. Серебренников

*Институт природно-технических систем, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: swsilv@gmail.com*

Сезонные аномалии термического индекса апвеллинга рассмотрены на примере тихоокеанских апвеллингов (Чилийского, Перуанского и Калифорнийского), входящих в восточную пограничную апвеллинговую систему. Показано, что для северной и южной части тихоокеанских апвеллингов пик максимальной площади положительной аномалии температуры поверхности океана в апвеллинговой зоне совпадает (с точностью до одного месяца) с максимальным по абсолютной величине значением термического индекса. Утверждение справедливо и для отрицательной температурной аномалии, за исключением северной части Чилийского апвеллинга. Положительные температурные аномалии по занимаемой площади в большинстве случаев существенно больше отрицательных. Температурные аномалии в апвеллинговой зоне в основном обусловлены изменениями интенсивности апвеллингов, которые, в свою очередь, связаны с вариациями поля приповерхностного ветра. Сравнение сезонной изменчивости термического индекса для двух 20-летних периодов (1982–2001 и 2002–2021 гг.), а также сравнение площадей с аномально повышенной поверхностной температурой океана показали незначительное усиление северной и южной частей всех тихоокеанских апвеллингов, за исключением южной части Калифорнийского, который незначительно ослаб.

**Ключевые слова:** термический индекс апвеллинга, сезонные аномалии, прибрежный апвеллинг, температура поверхности океана

Одобрена к печати: 17.05.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-45-57

### Введение

Системы восточного пограничного апвеллинга EBUS (*англ.* Eastern Boundary Upwelling Systems) относятся к числу наиболее продуктивных морских регионов мира, обеспечивая крупнейший пелагический промысел на относительно небольшой площади океана (Chavez et al., 2003, 2008; Pauly, Christensen, 1995). Под апвеллингом понимают подъём глубинных вод океана к поверхности. Системы EBUS представлены наиболее известным типом апвеллинга — прибрежным, который перемещает более холодные и богатые биогенами воды из глубин океана к поверхности, замещая более тёплые, бедные биогенами поверхностные воды. Эти системы вносят непропорциональный вклад в глобальную продуктивность океана, представляя важные экосистемные услуги человеческому сообществу (Bindoff et al., 2019; Bograd et al., 2023).

В настоящей работе рассматриваются тихоокеанские системы апвеллингов, входящие в EBUS. Тихоокеанские системы расположены на восточных границах широкого субтропического бассейна и, за исключением Южно-Калифорнийской бухты, имеют узкие континентальные шельфы с глубинными водами с высоким содержанием питательных веществ и низким содержанием кислорода. На тихоокеанские системы в значительной степени влияют цикл Эль-Ниньо — Южное колебание и экваториальные условия Тихого океана через океанические и атмосферные связи (Dewitte et al., 2012; Gaçon et al., 2019).

Апвеллинг обусловлен как направленным ветровым напряжением вдоль побережья, которое вызывает поверхностный перенос Экмана, так и его пространственной неоднородностью, что приводит к генерации дополнительных восходящих вертикальных движений, связанных с завихренностью ветра. В настоящей работе рассматривается только результат этих воздействий, выраженный в понижении температуры поверхности океана (ТПО) в апвелли-

ноговой, лежащей рядом с берегом, зоне относительно температуры в удалённой (примерно на расстояние семи радиусов деформации Россби) зоны. Надо отметить, что максимальное по абсолютной величине значение термического индекса апвеллинга (ТИА) наблюдается с большой задержкой (несколько месяцев) относительно максимальной суммарной вертикальной скорости экмановских индекса апвеллинга и накачки, обусловленных ветровым воздействием.

Сезонность тихоокеанских апвеллингов обусловлена главным образом субтропическим антициклоном восточной части Тихого океана, который создаёт благоприятные для развития апвеллинга ветры вдоль побережья (Ancapichún, Garcés-Vargas, 2015; Murphree et al., 2003; Strub et al., 2019). Это приводит к переносу холодной, бедной кислородом, с высоким содержанием питательных веществ воды к поверхности моря над континентальным шельфом (Pinochet et al., 2019).

Смещение субтропического максимума давления в восточной части Тихого океана приводит к изменению вектора ветра в прибрежной зоне. Вдольбереговой ветер также зависит от топографии местности, разности значений температуры воды и берега и других факторов. Вызываемый сгонным ветром подъём воды зависит ещё и от топографии дна, вдольбереговых течений, вертикальных и горизонтальных адвективных переносов воды. Всё это затрудняет анализ и долгосрочное прогнозирование трендов изменения апвеллингов. В некоторых публикациях отмечалась систематическая долговременная интенсификация прибрежных апвеллингов в EBUS вследствие глобального потепления (Abrahams et al., 2021; Bakun, 1990; Oyazún, Brierley, 2019; Varela et al., 2015). В других работах отмечается отсутствие значимой положительной тенденции в интенсивности апвеллингов (Bakun et al., 2015; García-Reyes et al., 2023; Polonsky, Serebrennikov, 2020a, b, 2021a, b). В исследовании (García-Reyes et al., 2023) на основании ТПО с пространственным разрешением  $0,01 \times 0,01^\circ$  за 20-летний период (с июня 2002 г. по май 2022 г.) были проанализированы все прибрежные апвеллинги системы EBUS. Каждый апвеллинг делился на три субрегиона (полярный, средний и экваториальный), для которых рассчитывалась площадь, занимаемая апвеллинговыми водами в каждый сезон. Уменьшение площади наблюдалось только для экваториальных субрегионов Бенгельского и Калифорнийского апвеллингов в определённые сезоны, что согласуется с настоящей работой для рассматриваемых апвеллингов.

В настоящей работе сравниваются сезонные изменения площади с аномальными ТПО в апвеллинговой зоне и сезонные изменения ТИА за два 20-летних периода для тихоокеанских апвеллингов EBUS.

## Материалы и методика их обработки

Для расчёта температурных аномалий в работе были проанализированы ежедневные карты ТПО 4-го уровня (Level 4) аналитической обработки данных с пространственным разрешением около  $0,05 \times 0,05^\circ$  за 40-летний период (с 1982 по 2021 г.). Информация заимствовалась с сайта CMEMS (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service), на котором выложены массивы данных с информацией о температуре поверхности океана (Product ID: SST\_GLO\_SST\_L4\_REP\_OBSERVATIONS\_010\_011, [https://data.marine.copernicus.eu/product/SST\\_GLO\\_SST\\_L4\\_REP\\_OBSERVATIONS\\_010\\_011/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_011/description)).

Спутниковые данные могут быть искажены по нескольким причинам, в том числе: водяной пар в атмосфере, атмосферный аэрозоль (пыль), изменения поверхности (например, чрезмерная шероховатость), проблемы с калибровкой прибора. Для максимального устранения искажений поставщики данных использовали систему коррекции смещения, основанную на статистике совпадения спутниковых и эталонных (например, с дрейфтеров и буёв «Арго») измерений. Типичное стандартное отклонение между данными с дрейфтеров (океанографических устройств, свободно плавающих на поверхности) и обработанными спутниковыми данными составляет 0,4 К, между данными профилирующих буёв «Арго» и теми же спутниковыми данными (Worsfold et al., 2023) — 0,35 К.

Термический индекс апвеллинга рассчитывался вычитанием среднего значения ТПО в оффшорной (удалённой от берега) зоне из каждого значения в апвеллинговой зоне для каждой географической широты.

Апвеллинговая зона выбиралась вплотную к берегу, и её ширина была выбрана  $0,75^\circ$ . Ширина оффшорной зоны была выбрана равной  $2,5^\circ$ , а расстояние между оффшорной и апвеллинговой зонами составляла  $5,5^\circ$ . С целью оценки влияния этого расстояния на ТИА для северной и южной части Чилийского апвеллинга оно было временно увеличено на  $2,0^\circ$ , что составило  $7,5^\circ$ . В результате максимальные значения ТИА выросли на  $0,5^\circ\text{C}$ , но остались в те же месяцы: в июне — для северной части, в марте — апреле — для южной, т. е. на качественный результат это не повлияло.

Каждая апвеллинговая система делилась на две части: северную и южную. Для каждого суток года и для всех точек поверхности океана в апвеллинговой и оффшорной зонах вычислялась средняя температура за весь период исследования (1982–2021). Затем из ежедневной температуры поверхности океана была вычтена ежедневная средняя температура в каждой точке поверхности океана, в результате чего были получены массивы данных с ежедневной аномалией ТПО. Последние разбивались на два кластера: а) значения, попадающие в диапазоны положительных аномалий ( $2,0\text{--}2,5^\circ\text{C}$ ;  $2,5\text{--}3,0$ ;  $3,0\text{--}3,5$ ;  $3,5\text{--}4,0$ ;  $4,0\text{--}4,5^\circ\text{C}$ ), и б) значения, попадающие в диапазоны отрицательных аномалий ( $-2,0\text{--}-2,5^\circ\text{C}$ ;  $-2,5\text{--}-3,0$ ;  $-3,0\text{--}-3,5$ ;  $-3,5\text{--}-4,0$ ;  $-4,0\text{--}-4,5^\circ\text{C}$ ). В итоге были получены карты ежедневных, ежемесячных и годовых аномалий для разных температурных диапазонов для апвеллинговой и оффшорной зон. Подобная методика была применена в работе (Polonsky, Serebrennikov, 2023). Сезонные изменения площади с аномально повышенной и пониженной ТПО вычислялись суммированием площадей ячеек сетки, образованной пространственным разрешением данных. Зная географическую широту ячейки сетки, пространственное разрешение (около  $0,05 \times 0,05^\circ$ ) и количество метров в градусе широты и долготы, можно вычислить занимаемую площадь на поверхности океана для каждой ячейки. Например, площадь ячейки сетки для Чилийского апвеллинга с южной широтой  $31^\circ$  составит  $27,558 \text{ км}^2$ .

Для рассматриваемых тихоокеанских апвеллингов были построены совместные графики сезонных изменений ТПО в оффшорной и апвеллинговой зонах, а также ТИА, для оценки изменчивости которых были рассчитаны доверительные интервалы с использованием распределения Стьюдента. При расчёте доверительного интервала был выбран уровень значимости  $0,05$ , что соответствует доверительной вероятности  $0,95$ . Доверительные интервалы рассчитывались для каждого месяца всех графиков сезонных изменений. Для 20-летнего периода критическое значение  $t$ -распределения Стьюдента при числе степеней свободы равном 19 было  $2,093$ , для 40-летнего —  $2,023$ . В подписях к рисункам даны средние за все месяцы среднеквадратичные (стандартные) отклонения (СКО). Доверительный интервал для каждого параметра вычислялся по следующей формуле:

$$\mu = \bar{X} \pm t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где  $\mu$  — математическое ожидание;  $\bar{X}$  — среднее значение (оценка математического ожидания);  $n$  — объём выборки;  $t_{\alpha}$  — критическое значение  $t$ -распределения Стьюдента с уровнем значимости  $\alpha$  и числом степеней свободы  $n - 1$ ;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение по выборке, состоящей из  $n$  членов.

Для оценки изменений ТИА во времени вычисления термических аномалий и ТИА проводились для двух 20-летних временных диапазонов: с 1982 по 2001 г. и с 2002 по 2021 г.

### Северная часть Чилийского апвеллинга ( $-30\text{--}-18^\circ$ )

Индекс ТИА по абсолютной величине максимален в мае — июне ( $-2,8^\circ\text{C}$ ) и минимален в январе и декабре (рис. 1, справа, см. с. 48). Максимальный по абсолютной величине ТИА указывает на максимальный (по этому параметру) апвеллинг.

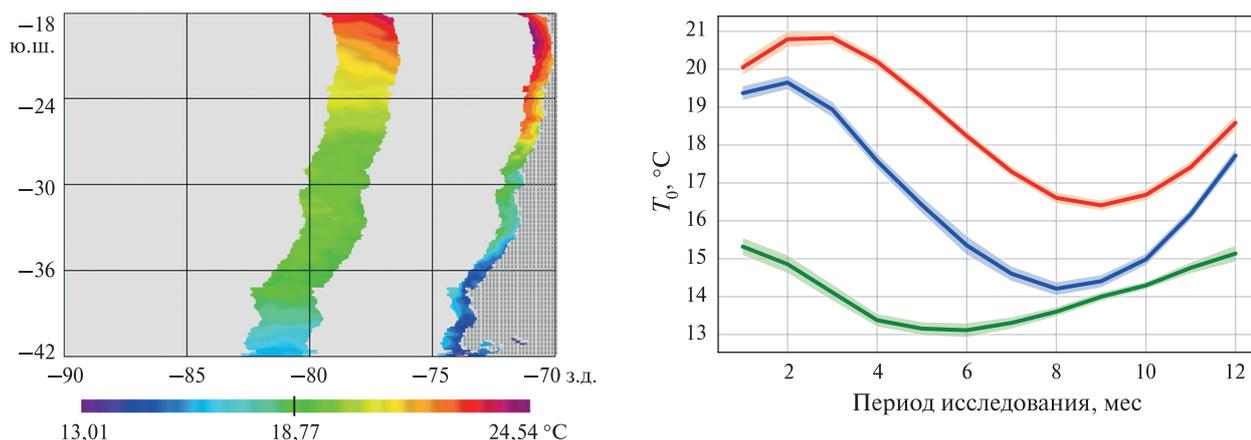


Рис. 1. Оффшорная и апвеллинговая зоны ТПО Чилийского апвеллинга (слева). Сезонные изменения ТПО в оффшорной (0,50 °С) и апвеллинговой (0,58 °С) зонах (красная и синяя кривые) и ТИА (0,54 °С) (зелёная кривая) за период с 1982 по 2021 г. Для наглядности к графику ТИА с минимальной температурой  $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  добавлена постоянная  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Полупрозрачным цветом показаны доверительные интервалы, средние СКО которых даны в скобках (справа)

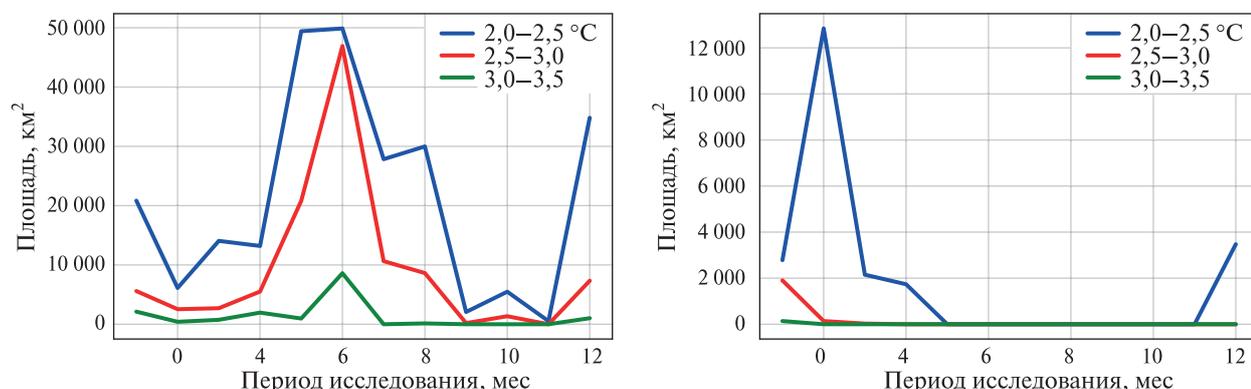


Рис. 2. Сезонные изменения площади с аномально повышенной ТПО в апвеллинговой зоне в периоды с 1982 по 2001 г. (слева) и с 2002 по 2021 г. (справа)

В апвеллинговой зоне пик площади с аномально повышенной ТПО в период 1982–2001 гг. тоже наблюдался в июне (рис. 2, слева). В период 2002–2021 гг. повышенная температурная аномалия наблюдалась в феврале (рис. 2, справа), в месяц, когда апвеллинг был близок к минимальному. Поскольку подобные аномалии не наблюдались в оффшорной зоне, то можно сделать вывод, что они обусловлены изменениями интенсивности апвеллинга. Отсутствие положительных аномалий ТПО в месяцы интенсивного развития апвеллинга во втором 20-летнем периоде косвенно указывает на усиление последнего.

На рис. 3 приведено сравнение сезонных изменений ТИА за два периода. Видно, что во второй временной период значения ТИА в месяцы с максимальным апвеллингом (май–июнь, согласно рис. 1 (справа)) были меньше (больше по абсолютной величине), что говорит об усилении апвеллинга

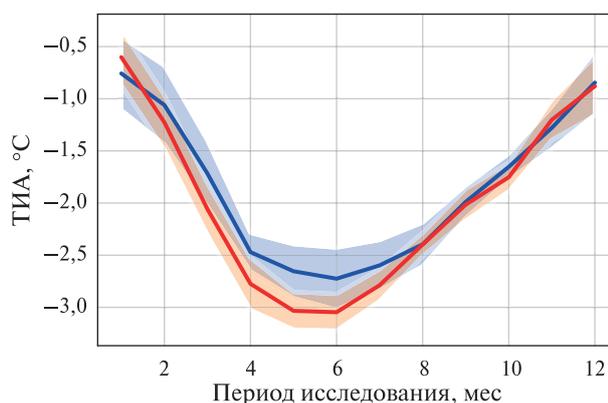


Рис. 3. Сезонные изменения ТИА за периоды 1982–2001 гг. (синий цвет) и 2002–2021 гг. (красный цвет). Доверительные интервалы показаны полупрозрачным цветом, их средние СКО составляют 0,58 и 0,46 °С соответственно

по сравнению с первым периодом. Надо отметить, что в первый период были два события Эль-Ниньо — в 1983 и в 1997 гг., которые внесли положительные аномалии, но если их заменить средними значениями, то разница между сезонными изменениями ТИА останется, но немного уменьшится (примерно на 0,1 °С).

### Южная часть Чилийского апвеллинга (–42...–30°)

Термический индекс апвеллинга по абсолютной величине максимален в марте (–4 °С) и минимален в сентябре (рис. 4, слева). На рис. 4 (справа) приведено сравнение сезонных изменений ТИА за два периода. Видно, что во второй временной период с февраля по ноябрь значения ТИА понизились, что говорит об относительном усилении апвеллинга по сравнению с первым периодом.

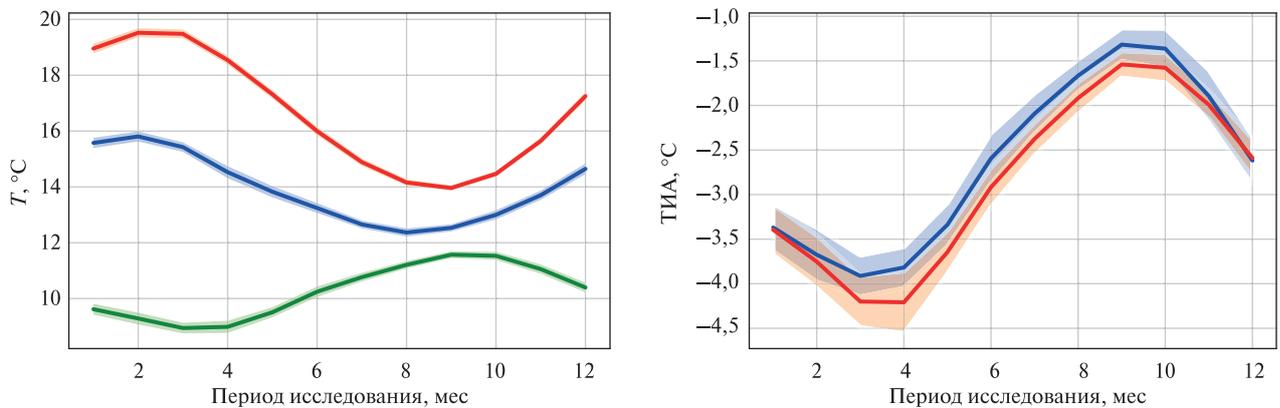


Рис. 4. Сезонные изменения ТПО в оффшорной (0,44 °С) и апвеллинговой (0,55 °С) зонах (красная и синяя кривые) и термический индекс апвеллинга (0,56 °С) за период с 1982 по 2021 г. Для наглядности к графику ТИА с минимальной температурой (–4 °С) добавлена постоянная 13 °С (зелёная кривая). Средние СКО доверительных интервалов даны в скобках (слева). Сезонные изменения ТИА за периоды 1982–2001 гг. (синий цвет) и 2002–2021 гг. (красный цвет), средние СКО которых составляют 0,56 и 0,52 °С соответственно (справа). Для всех графиков полупрозрачным цветом показаны доверительные интервалы

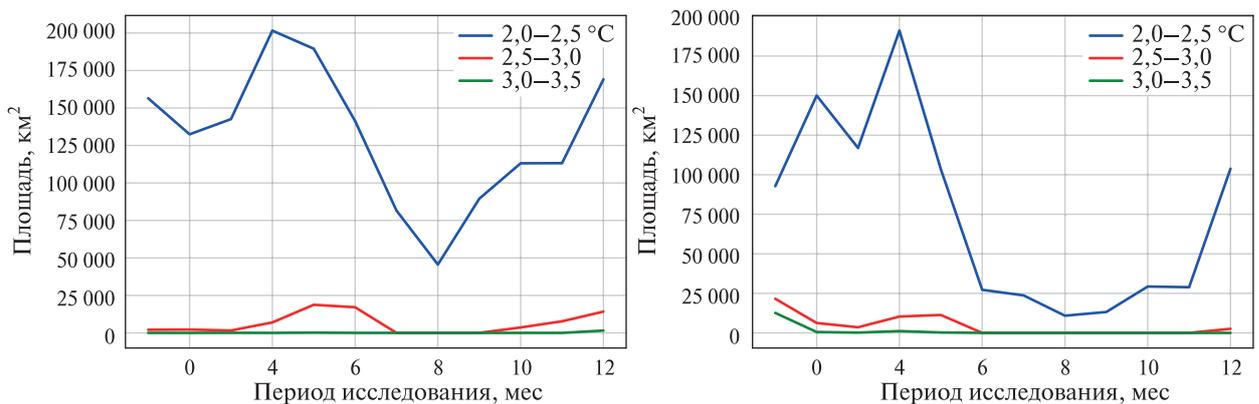


Рис. 5. Сезонные изменения площади с аномально повышенной ТПО в апвеллинговой зоне в периоды с 1982 по 2001 г. (слева) и с 2002 по 2021 г. (справа)

В апвеллинговой зоне (март – апрель) максимальная площадь с аномально повышенной ТПО в период 1982–2001 гг. наблюдалась в мае – июне (рис. 5, слева). В период 2002–2021 гг. максимальная площадь с повышенной температурной аномалией наблюдалась в январе

(рис. 5, справа) и не сильно отличалась от предыдущего периода, т.е. сделать однозначный вывод из сравнения площадей с аномально повышенной ТПО об интенсификации апвеллинга нельзя.

### Северная часть Перуанского апвеллинга (–11,0...–2,3°)

Термический индекс апвеллинга по абсолютной величине максимален в апреле (–5,6 °С) и минимален в октябре (рис. 6, справа). В апвеллинговой зоне максимальная площадь с аномально повышенной ТПО в период 1982–2001 гг. наблюдалась с марта по май (рис. 7, слева). В период 2002–2021 гг. повышенная температурная аномалия наблюдалась в мае – июне (рис. 7, справа), т.е. центр аномалий сдвинулся на один месяц от апреля. Более того, в апреле, когда интенсивность апвеллинга была максимальной, площадь с положительной аномалией была близка к минимуму. Таким образом, сравнение площадей с аномально повышенной ТПО указывает на незначительное усиление апвеллинга.

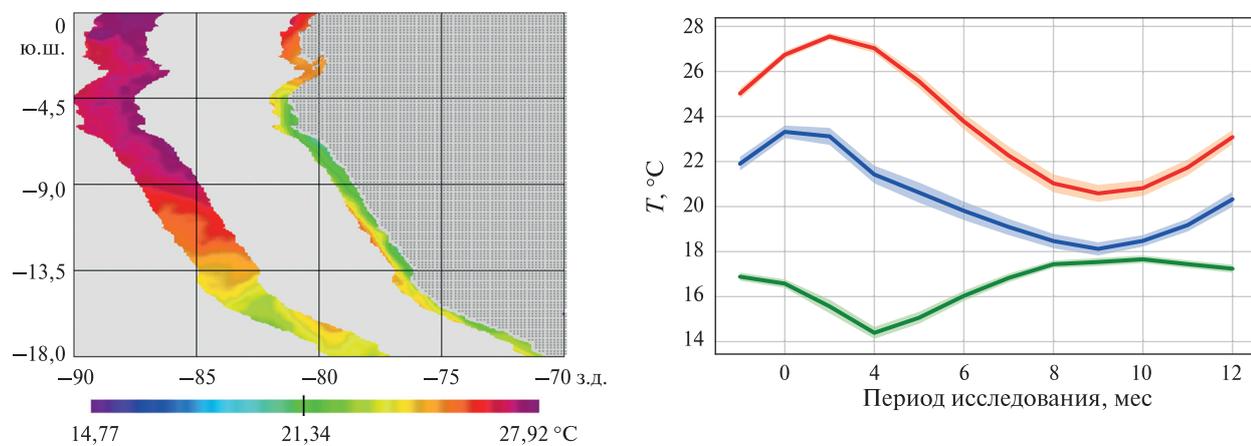


Рис. 6. Оффшорная и апвеллинговая зоны ТПО Перуанского апвеллинга (слева). Сезонные изменения температуры поверхности океана в оффшорной (0,97 °С) и апвеллинговой (1,09 °С) зонах (красная и синяя кривые) и термический индекс апвеллинга (0,66 °С) (зелёная кривая) за период с 1982 по 2021 г. Для наглядности к графику ТИА с минимальной температурой (–5,6 °С) добавлена постоянная 20 °С. Для всех графиков полупрозрачным цветом показаны доверительные интервалы, средние СКО которых даны в скобках (справа)

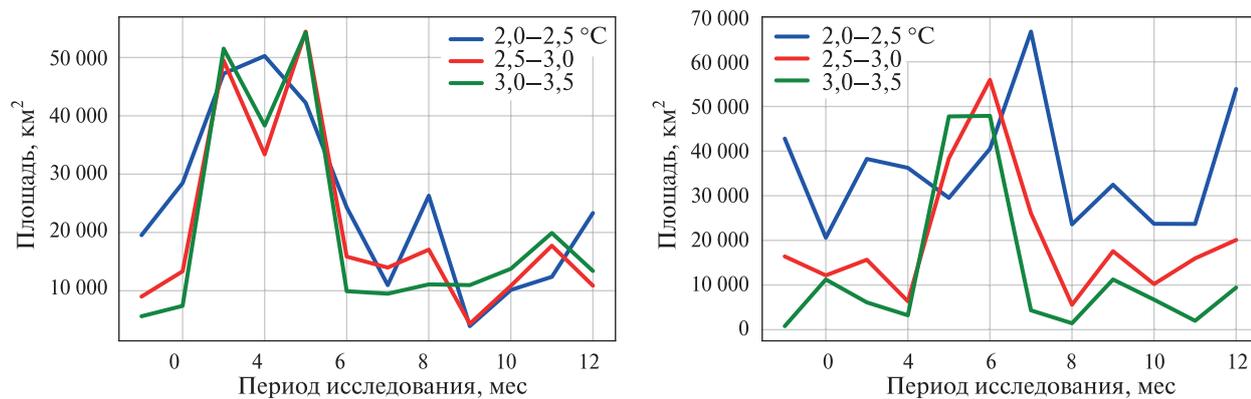


Рис. 7. Сезонные изменения площади с аномально повышенной ТПО в апвеллинговой зоне в периоды с 1982 по 2001 г. (слева) и с 2002 по 2021 г. (справа)

Для всего периода наблюдений (1982–2021) максимальные значения площади с аномально повышенной температурой в диапазоне абсолютных значений 3,0–3,5 °С примерно в пять раз больше, чем с аномально пониженной (иллюстрация не приводится).

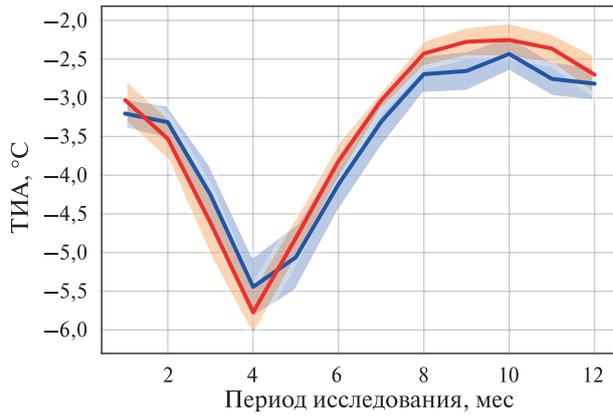


Рис. 8. Сезонные изменения ТИА за периоды 1982–2001 гг. (синий цвет) и 2002–2021 гг. (красный цвет). Доверительные интервалы показаны полупрозрачным цветом, средние СКО которых составляют 0,69 и 0,59 °С соответственно

Видно, что во второй временной период с февраля по апрель (в месяц максимальной интенсивности апвеллинга) значения ТИА понизились, а с мая по декабрь были выше. По этим данным можно сделать вывод о несущественной интенсификации северной части апвеллинга.

Пик площади для аномально повышенной и пониженной ТПО приходится на один месяц позже максимального значения ТИА.

На рис. 8 приведено сравнение сезонных изменений ТИА за два периода.

### Южная часть Перуанского апвеллинга (–16,3...–11,0°)

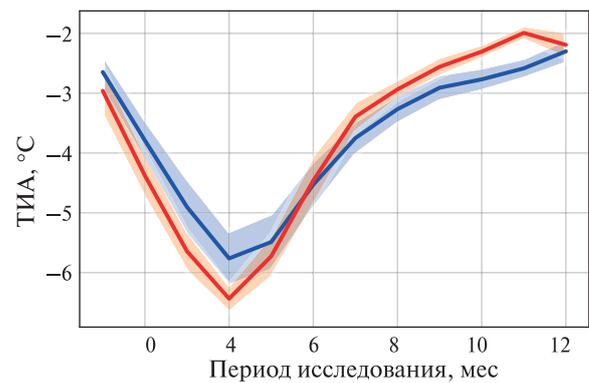
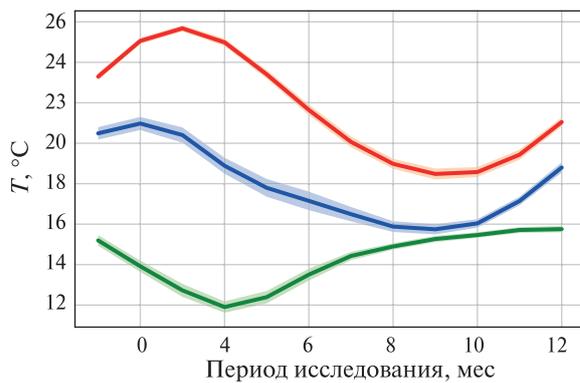


Рис. 9. Сезонные изменения ТПО в оффшорной (0,71 °С) и апвеллинговой (1,03 °С) зонах (красная и синяя кривые) и термический индекс апвеллинга (0,72 °С) (зелёная кривая) за период с 1982 по 2021 г. Для наглядности к графику ТИА с минимальной температурой (–6 °С) добавлена постоянная 18 °С. Средние СКО доверительных интервалов даны в скобках (слева). Сезонные изменения ТИА за периоды 1982–2001 гг. (синий цвет) и 2002–2021 гг. (красный цвет), средние СКО которых составляют 0,73 и 0,62 °С соответственно (справа). Для всех графиков полупрозрачным цветом показаны доверительные интервалы

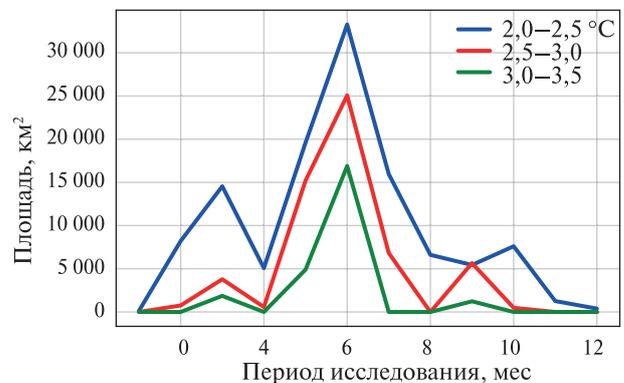
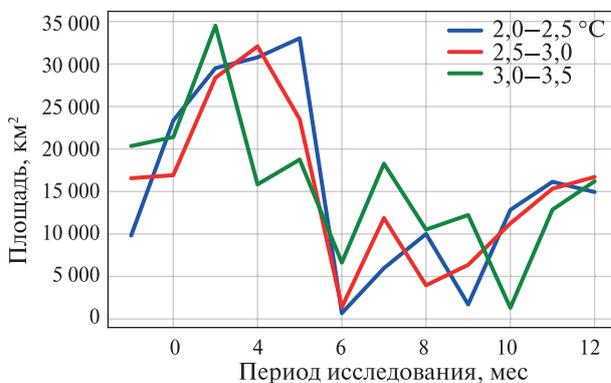


Рис. 10. Сезонные изменения площади с аномально повышенной ТПО в апвеллинговой зоне в периоды с 1982 по 2001 г. (слева) и с 2002 по 2021 г. (справа)

Термический индекс апвеллинга по абсолютной величине максимален в апреле ( $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и минимален в декабре (рис. 9, слева, см. с. 51). На рис. 9 (справа) приведено сравнение сезонных изменений ТИА за два периода. Во второй временной период значения ТИА в месяцы с максимальным апвеллингом (март – май) были больше по абсолютной величине, т. е. можно сказать об относительном усилении апвеллинга по сравнению с первым периодом.

В апвеллинговой зоне максимальная площадь с аномально повышенной ТПО в период 1982–2001 гг. наблюдалась с марта по май (рис. 10, слева, см. с. 51). В период 2002–2021 гг. пик повышенной температурной аномалии сместился в июнь (рис. 10, справа). Более того, в апреле, когда интенсивность апвеллинга была максимальной, площадь с положительной аномалией была близка к минимуму. Таким образом, сравнение площадей с положительной аномалией ТПО указывает на незначительное усиление апвеллинга.

### Северная часть Калифорнийского апвеллинга ( $40,0-47,1^{\circ}$ )

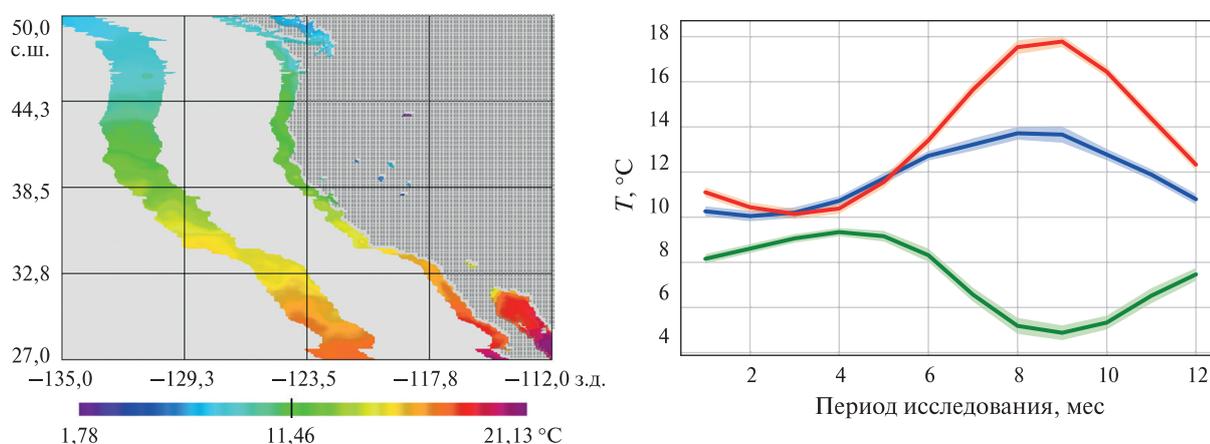


Рис. 11. Оффшорная и апвеллинговая зоны ТПО Калифорнийского апвеллинга (слева). Сезонные изменения ТПО в оффшорной ( $0,81\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и апвеллинговой ( $0,81\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) зонах (красная и синяя кривые) и ТИА ( $0,86\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (зелёная кривая) за период с 1982 по 2021 г. Для наглядности к графику ТИА с минимальной температурой ( $-4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) добавлена постоянная  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для всех графиков полупрозрачным цветом показаны доверительные интервалы, средние СКО которых даны в скобках (справа)

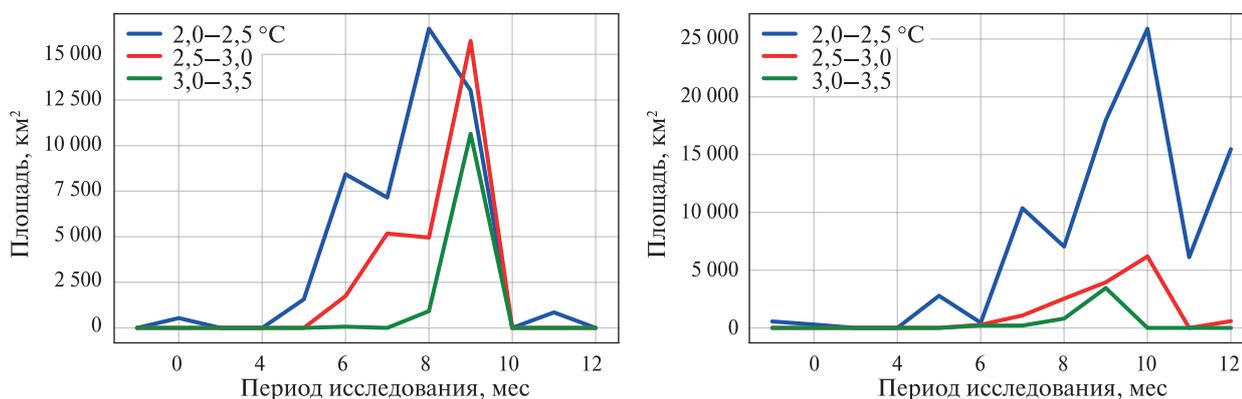


Рис. 12. Сезонные изменения площади с аномально повышенной ТПО в апвеллинговой зоне в периоды с 1982 по 2001 г. (слева) и с 2002 по 2021 г. (справа)

Термический индекс апвеллинга по абсолютной величине максимален в сентябре ( $-4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и минимален в апреле (рис. 11, справа). В апвеллинговой зоне пик площади с аномально повышенной ТПО в период 1982–2001 гг. наблюдался в сентябре (рис. 12, слева).

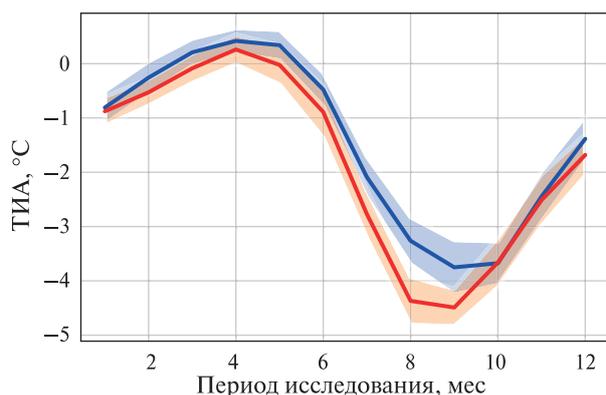


Рис. 13. Сезонные изменения ТИА за периоды 1982–2001 гг. (синий цвет) и 2002–2021 гг. (красный цвет) Доверительные интервалы показаны полупрозрачным цветом, их средние СКО составляют 0,81 и 0,84 °С соответственно

В период 2002–2021 гг. пик повышенной температурной аномалии уменьшился примерно в три раза и частично сместился к октябрю (рис. 12, справа). Таким образом, сравнение площадей с аномально повышенной ТПО указывает на незначительное усиление апвеллинга.

На рис. 13 приведено сравнение сезонных изменений ТИА за два периода. Во второй временной период с января по октябрь значения ТИА в месяцы с максимальным развитием апвеллинга (август – октябрь) были больше по абсолютной величине, т. е. наблюдалось небольшое усиление апвеллинга.

Для всего периода наблюдений (1982–2021) максимальные значения площади с аномально повышенной температурой в диапазоне абсолютных значений 2,5–3,0 °С в три раза больше, чем с аномально пониженной (иллюстрация не приводится). Пик площади для аномально повышенной ТПО приходится на тот же месяц, что и максимальное значение ТИА. Для аномально пониженной ТПО пик площади приходится на один месяц раньше максимального значения ТИА.

### Южная часть Калифорнийского апвеллинга (32,5–40,0°)

Термический индекс апвеллинга по абсолютной величине максимален в сентябре (–2,9 °С) и минимален в марте (рис. 14, слева). На рис. 14 (справа) приведено сравнение сезонных изменений ТИА за два периода. Во второй временной период значения ТИА в месяцы с максимальным развитием апвеллинга (август – октябрь) были больше по абсолютной величине.

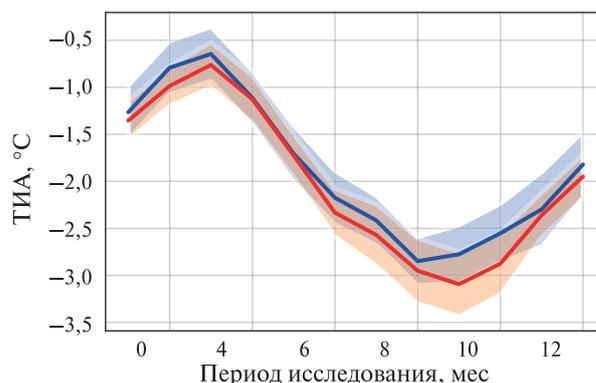
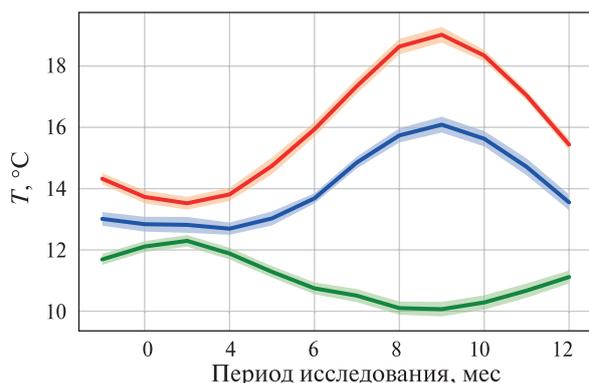


Рис. 14. Сезонные изменения ТПО в оффшорной (0,70 °С) и апвеллинговой (0,75 °С) зонах (красная и синяя кривые) и термический индекс апвеллинга (0,66 °С) (зелёная кривая) за период с 1982 по 2021 г. Для наглядности к графику ТИА с минимальной температурой (–2,9 °С) добавлена постоянная 13 °С. Средние СКО доверительных интервалов даны в скобках (слева). Сезонные изменения ТИА за период 1982–2001 гг. (синий) и за период 2002–2021 гг., средние СКО которых составляют 0,69 и 0,61 °С соответственно (справа). Для всех графиков полупрозрачным цветом показаны доверительные интервалы

В апвеллинговой зоне пик площади с аномально повышенной ТПО в период 1982–2001 гг. наблюдался в ноябре (рис. 15, слева, см. с. 54).

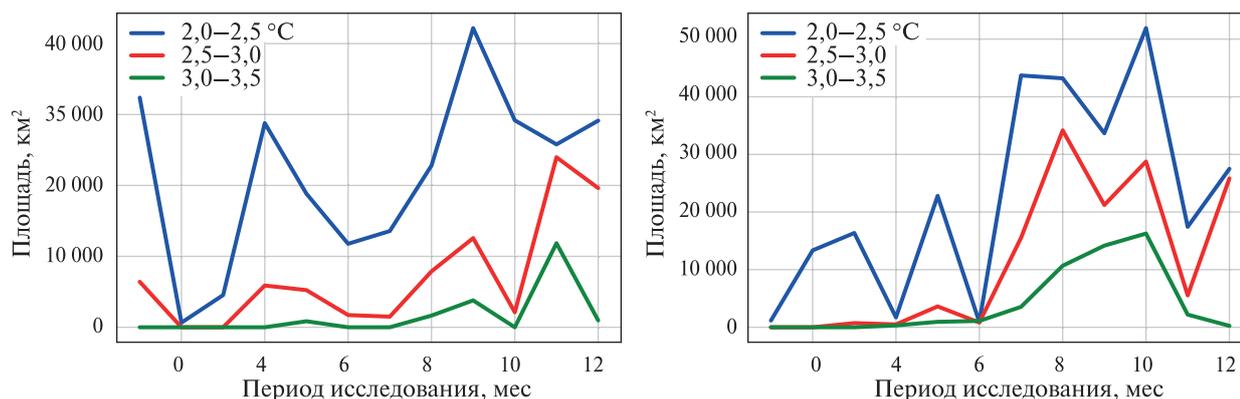


Рис. 15. Сезонные изменения площади с аномально повышенной ТПО в апвеллинговой зоне в периоды с 1982 по 2001 г. (слева) и с 2002 по 2021 г. (справа)

В период 2002–2021 гг. площадь с повышенной температурной аномалией наблюдалась с августа по октябрь (рис. 15, справа), т. е. в месяцы, когда апвеллинг должен быть максимален согласно ТИА. Это означает, что во втором 20-летии апвеллинг в южной части должен ослабнуть, что противоречит рис. 14 (справа), на котором значения ТИА в августе – октябре больше по абсолютной величине. Достоверный вывод по графикам изменения ТИА на рис. 14 (справа) сделать нельзя, так как 95%-е доверительные интервалы для них значительно пересекаются. Более верным остаётся предположение, основанное на превышении площади с аномально повышенной ТПО, что во втором 20-летии по сравнению с первым произошло ослабление апвеллинга.

### Заключение

Сравнение сезонной изменчивости ТИА для двух 20-летних периодов с доверительной вероятностью 0,95 по  $t$ -распределению Стьюдента показало небольшое усиление почти всех тихоокеанских апвеллингов как для северной, так и для южной части. Исключение составила южная часть Калифорнийского апвеллинга, где по сравнению сезонной изменчивости ТИА нельзя сделать достоверный вывод. Сравнение площадей с аномально повышенной ТПО в апвеллинговой зоне также показало незначительное усиление почти всех частей апвеллингов. Исключение составили южные части Чилийского и Калифорнийского апвеллингов. Причём последний по этим данным явно ослабевает (для Чилийского нет однозначного вывода). В итоге, согласно расчётам по двум методам, можно сделать вывод о незначительной интенсификации всех частей тихоокеанских апвеллингов, кроме южной части Калифорнийского, который ослабевает. Надо отметить, что этот результат хорошо согласуется с работой (García-Reyes et al., 2023), где на основании сравнения площадей ТПО за 20-летний период был сделан вывод об ослаблении экваториального субрегиона Калифорнийского апвеллинга в определённые сезоны. Для остальных субрегионов тихоокеанских апвеллингов не наблюдалось существенных изменений. По расположению экваториальный регион соответствует южной части Калифорнийского апвеллинга.

Для обеих частей апвеллингов пик максимальной площади положительной аномалии ТПО в апвеллинговой зоне совпадает с точностью до одного месяца с максимальным по абсолютной величине значением ТИА, что объясняется ослаблением апвеллинга в эти месяцы.

Причины несущественных изменений интенсификаций апвеллингов системы EBUS в условиях общего потепления климата ещё предстоит изучить. Основными факторами, вызывающим прибрежные апвеллинги, являются модуль и направление стонного ветра, зависящего от градиента давления, топографии местности и т. п. Частичное ослабление Калифорнийского апвеллинга, по всей видимости, связано с общим потеплением климата и недостаточным усилением компенсирующего приповерхностного ветра или его направлением, неблагоприятным для развития апвеллинга.

Автор выражает благодарность анонимному рецензенту за критические замечания, которые помогли конструктивно доработать статью.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость морской среды и прилегающих территорий в широком диапазоне масштабов» (гос. рег. № 124020100120-9).

## Литература

1. *Abrahams A., Schlegel R. W., Smit A. J.* Variation and Change of Upwelling Dynamics Detected in the World's Eastern Boundary Upwelling Systems // *Frontiers in Marine Science*. 2021. V. 8. Article 626411. DOI: 10.3389/fmars.2021.626411.
2. *Ancapichún S. H., Garcés-Vargas J.* Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile // *Ciencias Marinas*. 2015. V. 41. No. 1. P. 1–20. DOI: 10.7773/cm.v41i1.2338.
3. *Bakun A.* Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling // *Science*. 1990. V. 247. P. 198–201. DOI: 10.1126/science.247.4939.198.
4. *Bakun A., Black B. A., Bograd S. J. et al.* Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems // *Current Climate Change Reports*. 2015. V. 1. P. 85–93. DOI: 10.1007/s40641-015-0008-4.
5. *Bindoff N. L., Cheung W. W. L., Kairo J. G. et al.* Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities // *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* / Eds. Pörtner H.-O., Roberts D. C., Masson-Delmotte V. et al. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2019. Ch. 5. P. 447–587.
6. *Bograd S. J., Jacox M. J., Hazen E. L. et al.* Climate Change Impacts on Eastern Boundary Upwelling Systems // *Annual Review of Marine Science*. 2023. V. 15. P. 303–328. DOI: 10.1146/annurev-marine-032122-021945.
7. *Chavez F. P., Ryan J., Lluch-Cota Salvador E., Niquen M.* From anchovies to sardine and back: multidecadal change in the Pacific Ocean // *Science, New Series*. 2003. V. 299. No. 5604. P. 217–221. DOI: 10.1126/science.107588.
8. *Chavez F. P., Bertrand A., Guevara-Carrasco R. et al.* The northern Humboldt Current System: brief history, present status and a view towards the future // *Progress in Oceanography*. 2008. V. 79. P. 95–105. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.012.
9. *Dewitte B., Vazquez-Cuervo J., Goubanova K. et al.* Change in El Niño flavours over 1958–2008: implications for the long-term trend of the upwelling off Peru // *Deep-Sea Research*. 2012. Pt. 2. V. 77. P. 143–156. DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.04.011.
10. *García-Reyes M., Koval G., Sydeman W. J. et al.* Most eastern boundary upwelling regions represent thermal refugia in the age of climate change // *Frontiers in Marine Science*. 2023. V. 10. Article 1158472. DOI: 10.3389/fmars.2023.1158472.
11. *Garçon V., Karstensen J., Palacz A. et al.* Multidisciplinary Observing in the World Ocean's Oxygen Minimum Zone Regions: From Climate to Fish — The VOICE Initiative // *Frontiers in Marine Science*. 2019. V. 6. Article 722. DOI: 10.3389/fmars.2019.00722.
12. *Murphree T., Jessen P., Schwing F., Bograd S.* The seasonal cycle of wind stress curl and its relationship to subsurface ocean temperature in the Northeast Pacific // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. No. 9. Article 1469. DOI: 10.1029/2002GL016366.
13. *Oyarzún D., Brierley C.* The future of coastal upwelling in the Humboldt current from model projections // *Climate Dynamics*. 2019. V. 52. P. 599–615. DOI: 10.1007/s00382-018-4158-7.
14. *Pauly D., Christensen V.* Primary production required to sustain global fisheries // *Nature*. 1995. V. 374. P. 255–257. DOI: 10.1038/374255a0.
15. *Pinochet A., Garcés-Vargas J., Lara C., Olgún F.* Seasonal Variability of Upwelling off Central-Southern Chile // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Iss. 15. Article 1737. DOI: 10.3390/rs11151737.
16. *Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. (2020a).* On the Change in the Sea Surface Temperature in the Benguela Upwelling Region: Part II. Long-Term Tendencies // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. No. 9. P. 970–978. DOI: S0001433820090200.
17. *Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. (2020b).* Intensification of Eastern Boundary Upwelling Systems in the Atlantic and Pacific Oceans // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. V. 45. No. 6. P. 422–429. DOI: 10.3103/S1068373920060059.
18. *Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. (2021a).* Long-Term Tendencies of Intensity of Eastern-Boundary Upwelling Systems Assessed from Different Satellite Data. Part 2: Pacific Upwellings // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. No. 12. P. 1670–1679. DOI: 10.1134/S0001433821120173.

19. Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. (2021b). Modified technique for calculating the parameters of climatic variability of upwelling by thermal index // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. No. 9. P. 1137–1145. DOI: 10.1134/S0001433821090590.
20. Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. Changes in the Nature of Temperature Anomalies of the Black Sea Surface during the Warming Period of the Late 20<sup>th</sup> – Early 21<sup>st</sup> Centuries // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023. V. 59. No. 10. P. 1503–1514. DOI: 10.1134/S0001433823120174.
21. Strub P. T., James C., Montecino V. et al. Ocean Circulation Along the Southern Chile Transition Region (38°–46°S): Mean, Seasonal and Interannual Variability, with a Focus on 2014–2016 // *Progress in Oceanography*. 2019. V. 172. P. 159–198. DOI: 10.1016/j.pocean.2019.01.004.
22. Varela R., Alvarez I., Santos F. et al. Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982–2010? // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. Article 10016. DOI: 10.1038/srep10016.
23. Worsfold M., Good S., McLaren A., Fiedler E., Roberts-Jones J., Martin M. Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature. Reprocessing SST-GLO-SST-L4-REP-OBSERVATIONS-010-011 // *Quality Information Document*. 2023. Iss. 3. 24 p. <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-SST-QUID-010-011.pdf>.

## Seasonal anomalies of the thermal upwelling index in the Eastern Pacific Ocean

A. N. Serebrennikov

*Institute of Natural Technical Systems, Sevastopol 299011, Russia*  
*E-mail: swsilv@gmail.com*

Seasonal anomalies of the thermal upwelling index (TUI) are considered using the example of the Pacific upwellings (Chilean, Peruvian and California), which are part of the eastern boundary upwelling system. It is shown that for the northern and southern parts of the Pacific upwellings, the peak of the maximum area of the positive ocean surface temperature anomaly in the upwelling zone coincides (with an accuracy of up to one month) with the maximum absolute value of the thermal index. The statement is also true for the negative temperature anomaly, with the exception of the northern part of the Chilean upwelling. In most cases, positive temperature anomalies over the occupied area are significantly larger than negative ones. Temperature anomalies in the upwelling zone are mainly caused by changes in the intensity of upwellings, which, in turn, are associated with variations in the surface wind field. A comparison of the seasonal variability of the thermal index for two twenty-year periods (1982–2001, 2002–2021), as well as a comparison of areas with anomalously increased surface ocean temperatures, showed a slight increase in the northern and southern parts of all Pacific upwellings, with the exception of the southern part of California, which weakened slightly.

**Keywords:** thermal upwelling index, seasonal anomalies, coastal upwelling, ocean surface temperature

Accepted: 17.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-45-57

## References

1. Abrahams A., Schlegel R. W., Smit A. J., Variation and Change of Upwelling Dynamics Detected in the World's Eastern Boundary Upwelling Systems, *Frontiers in Marine Science*, 2021, Vol. 8, Article 626411, DOI: 10.3389/fmars.2021.626411.
2. Ancapichún S. H., Garcés-Vargas J., Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile, *Ciencias Marinas*, 2015, Vol. 41, No. 1, pp. 1–20, DOI: 10.7773/cm.v41i1.2338.
3. Bakun A., Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling, *Science*, 1990, Vol. 247, pp. 198–201, DOI: 10.1126/science.247.4939.198.
4. Bakun A., Black B. A., Bograd S. J. et al., Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems, *Current Climate Change Reports*, 2015, Vol. 1, pp. 85–93, DOI: 10.1007/s40641-015-0008-4.

5. Bindoff N. L., Cheung W. W. L., Kairo J. G. et al., Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities, In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Masson-Delmotte V. et al. (eds.), Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2019, Ch. 5., pp. 447–587.
6. Bograd S. J., Jacox M. J., Hazen E. L. et al., Climate Change Impacts on Eastern Boundary Upwelling Systems, *Annual Review of Marine Science*, 2023, Vol. 15, pp. 303–328, DOI: 10.1146/annurev-marine-032122-021945.
7. Chavez F. P., Ryan J., Lluch-Cota Salvador E., Niquen M., From anchovies to sardine and back: multidecadal change in the Pacific Ocean, *Science, New Series*, 2003, Vol. 299, No. 5604, pp. 217–221, DOI: 10.1126/science.107588.
8. Chavez F. P., Bertrand A., Guevara-Carrasco R. et al., The northern Humboldt Current System: brief history, present status and a view towards the future, *Progress in Oceanography*, 2008, Vol. 79, pp. 95–105, DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.012.
9. Dewitte B., Vazquez-Cuervo J., Goubanova K., et al., Change in El Niño flavours over 1958–2008: implications for the long-term trend of the upwelling off Peru, *Deep-Sea Research*, 2012, Pt. 2, Vol. 77, pp. 143–156, DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.04.011.
10. García-Reyes M., Koval G., Sydeman W. J. et al., Most eastern boundary upwelling regions represent thermal refugia in the age of climate change, *Frontiers in Marine Science*, 2023, Vol. 10, Article 1158472, DOI: 10.3389/fmars.2023.1158472.
11. Garçon V., Karstensen J., Palacz A. et al., Multidisciplinary Observing in the World Ocean’s Oxygen Minimum Zone Regions: From Climate to Fish — The VOICE Initiative, *Frontiers in Marine Science*, 2019, Vol. 6, Article 722, DOI: 10.3389/fmars.2019.00722.
12. Murphree T., Jessen P., Schwing F., Bograd S., The seasonal cycle of wind stress curl and its relationship to subsurface ocean temperature in the Northeast Pacific, *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, No. 9, Article 1469, DOI: 10.1029/2002GL016366.
13. Oyarzún D., Brierley C., The future of coastal upwelling in the Humboldt current from model projections, *Climate Dynamics*, 2019, Vol. 52, pp. 599–615, DOI: 10.1007/s00382-018-4158-7.
14. Pauly D., Christensen V., Primary production required to sustain global fisheries, *Nature*, 1995, Vol. 374, pp. 255–257, DOI: 10.1038/374255a0.
15. Pinochet A., Garcés-Vargas J., Lara C., Olgún F., Seasonal Variability of Upwelling off Central-Southern Chile, *Remote Sensing*. 2019, Vol. 11, Issue 15, Article 1737, DOI: 10.3390/rs11151737.
16. Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. (2020a), On the Change in the Sea Surface Temperature in the Benguela Upwelling Region: Part II. Long-Term Tendencies, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, Vol. 56, No. 9, pp. 970–978, DOI: S0001433820090200.
17. Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. (2020b), Intensification of Eastern Boundary Upwelling Systems in the Atlantic and Pacific Oceans, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, Vol. 45, No. 6, pp. 422–429, DOI: 10.3103/S1068373920060059.
18. Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. (2021a), Long-Term Tendencies of Intensity of Eastern-Boundary Upwelling Systems Assessed from Different Satellite Data. Part 2: Pacific Upwellings, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 12, pp. 1670–1679, DOI: 10.1134/S0001433821120173.
19. Polonsky A. B., Serebrennikov A. N. (2021b), Modified technique for calculating the parameters of climatic variability of upwelling by thermal index, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 9, pp. 1137–1145, DOI: 10.1134/S0001433821090590.
20. Polonsky A. B., Serebrennikov A. N., Changes in the Nature of Temperature Anomalies of the Black Sea Surface during the Warming Period of the Late 20<sup>th</sup>–Early 21<sup>st</sup> Centuries, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, Vol. 59, No. 10, pp. 1503–1514, DOI: 10.1134/S0001433823120174.
21. Strub P. T., James C., Montecino V. et al., Ocean Circulation Along the Southern Chile Transition Region (38°–46°S): Mean, Seasonal and Interannual Variability, with a Focus on 2014–2016, *Progress in Oceanography*, 2019, Vol. 172, pp. 159–198, DOI: 10.1016/j.pocean.2019.01.004.
22. Varela R., Álvarez I., Santos F. et al., Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982–2010?, *Scientific Reports*, 2015, Vol. 5, Article 10016, DOI: 10.1038/srep10016.
23. Worsfold M., Good S., McLaren A., Fiedler E., Roberts-Jones J., Martin M., Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature, Reprocessing SST-GLO-SST-L4-REP-OBSERVATIONS-010-011, *Quality Information Document*, 2023, Issue 3, 24 p., <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-SST-QUID-010-011.pdf>.