

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 280—292.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):280—292.

OCEANOLOGIA

Научная статья
УДК 551.465.46(265.1)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292

Изменчивость индекса апвеллинга в области Перуанского течения

***Джимми Хуан Мартина-Васкес, Светлана Михайловна Гордеева,
Валерий Николаевич Малинин***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, jimmymartinavasquez@gmail.com

Аннотация. В статье впервые рассматривается оценка интенсивности апвеллинга с использованием теории Экмана в области Перуанского течения за период 1980—2020 гг. Вертикальный поток водной массы через границу глубины трения принят в качестве индекса апвеллинга (ИА). Предложена методика расчета ИА по зональной и меридиональной компонентам скорости ветра в приводном слое океана. Рассчитаны статистические характеристики меридиональной и межгодовой изменчивости глубины трения, индекса апвеллинга. Выявлена корреляционная связь их друг с другом и с температурой поверхности океана для различных районов Перуанского апвеллинга.

Ключевые слова: Перуанский апвеллинг, индекс апвеллинга, глубина трения, теория Экмана, изменчивость индекса апвеллинга и глубины трения.

Для цитирования: Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н. Изменчивость индекса апвеллинга в области Перуанского течения // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 280—292. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292.

OCEANOLOGY

Original article

Variability of the upwelling index in the Peruvian Current region

Jimmy Juan Martina-Vasquez, Svetlana M. Gordeeva, Valery N. Malinin

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russian Federation

Summary. The Peruvian upwelling is one of the four most highly productive upwelling areas in the World Ocean and is the largest in terms of fish catches. The waters of the PA, which covers an area of approximately 0.02% of the area of the MO, produce about 20% of the world's fish catch. Large-scale fishing of small pelagic fish species is largely supported by the upwelling process, which contributes to the formation of high biological productivity of waters. The article discusses the assessment of upwelling intensity using Ekman's theory in the PA region for the period 1980-2020. The vertical flow of water mass across

© Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н., 2024

the friction depth boundary is taken as the upwelling index (IA). A technique is proposed for calculating IA using the zonal and meridional components of wind speed in the ocean surface layer. The basis for the calculations of wind components was the NCEP/DOE AMIP-II reanalysis archive (Reanalysis-2). The statistical characteristics of the meridional and interannual variability of friction depth and the upwelling index were calculated for 11 selected PA regions. It is shown that for most areas of the PA there are positive trends in the depth of friction and IA. This means increasing friction depth and increasing upwelling. A negative correlation was found between IA and friction depth for most areas of PA, as well as between SST and D, and between IA and SST. All types of connections between these parameters have a clear physical basis, which allows us to consider the correlation between them reliable.

Keywords. Peruvian upwelling, upwelling index, friction depth, Ekman theory, variability of upwelling index and friction depth.

For citation: Martina-Vasquez J. Ju., Gordeeva S. M., Malinin V. N. Variability of the upwelling index in the Peruvian Current region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):280—292. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292.

Введение

Перуанский апвеллинг (ПА) обусловлен взаимодействием океанических и атмосферных факторов, является одним из четырех наиболее высокопродуктивных районов апвеллинга в Мировом океане (МО) и крупнейшим по уловам рыбы [1—3]. ПА образован холодным Перуанским течением, которое берет начало из северной ветви Антарктического циркумполярного течения и течет к северу, к экватору. В результате ветра, дующего в направлении экватора, сила Кориолиса в пассатной зоне отклоняет течение на запад [4—5]. Область ПА плавно переходит в огромную зону юго-восточной части Тихого океана, в которой добывается максимальное количество ставриды в МО (4—4,5 млн т), причем доля России до 1990 г. составляла 27 % [6].

Процесс апвеллинга (подъем на поверхность богатых питательными веществами вод) способствует формированию здесь высокой биологической продуктивности [7—8], которая поддерживает крупный промысел мелких пелагических видов рыбы. В водах ПА, занимающего площадь примерно 0,02 % площади МО, добывается около 20 % мирового улова рыбы [9—13].

Очевидно, к числу важнейших абиотических факторов относится температура морской воды и интенсивность апвеллинга. Воздействие температуры воды на жизнедеятельность морских организмов исключительно многогранно [14]. Она может ускорять или замедлять рост численности отдельных видов и даже приводить к массовой гибели организмов. Апвеллинг в зоне Перуанского течения в соответствии с теорией Экмана возникает под действием пассатного ветра, дующего вдоль западных берегов Южной Америки и вызывающего перенос поверхностных вод с отклонением влево от направления ветра. Это приводит к подъёму в эвфотический слой промежуточных вод с повышенным содержанием биогенных элементов. В результате в верхнем слое океана создаются благоприятные условия для первичного продуцирования и развития фито- и зоопланктона, которые служат кормовой базой массовым видам пелагических рыб [15—16].

Однако оценить интенсивность апвеллинга очень непросто. Это связано с тем, что вертикальные скорости в океане малы и определяются с большими погрешностями, сравнимыми с их средними оценками. Интенсивность апвеллинга

часто определяется косвенными методами. С этой целью достаточно широкое распространение получили разнообразные индексы апвеллинга. Наиболее простые из них представляют собой простую разность температуры воды (ΔT_w) между прибрежной и морской акваторией, измеренной на одной и той же широте с целью количественной оценки прибрежного охлаждающего эффекта апвеллинга [17—19]. Основным недостатком этих методов является неоднозначность пространственного выбора широтных границ.

Более обоснованным является индекс апвеллинга (ИА), предложенный Бакуном в 1973 г. [20], который получил в зарубежных исследованиях довольно широкое распространение. Расчет данного индекса сводится к вычислению составляющих геострофического ветра в каждой точке выбранной области расчета по среднемесячным градиентам приводного атмосферного давления и, в конечном итоге, нахождению величины полного потока в виде экмановского переноса. Вычисленный полный поток водной массы характеризует лишь дрейфовую составляющую течения и не отражает вертикальное поступление воды из глубин океана. Этого недостатка лишен предложенный в работе [14] метод оценки интегрального ИА, позволяющий косвенно учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения.

Цель данной работы состоит в расчете глубины трения, ИА для области ПА за многолетний период (1980—2020 гг.), выявлении их межгодовой изменчивости, определении степени связи друг с другом и с температурой поверхности океана.

Исходные данные и методика расчетов

Основой для расчетов составляющих ветра в приводном слое океана послужил хорошо известный архив NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (Reanalysis-2) [21], который с 1979 г. является естественным продолжением архива NCEP Reanalysis-1. В этих архивах применяется комбинированный подход к усвоению всех видов исходной информации, однако основным является спутниковое зондирование. Архив R-2 охватывает период наблюдений с 1979 г. по настоящее время, использует обновлённые модели прогноза и ассимиляции данных. Пространственная область реализации модели простирается от 88,5° ю.ш. до 88,5° с.ш. и имеет разрешение 1,8° × 1,8°. Для области ПА в границах от 4° до 40° ю.ш. [22] выделено 73 точки в узлах сетки (рис. 1). Для указанных точек из данного архива выбирались среднемесячные значения зональной и меридиональной составляющих скорости ветра за период 1980—2020 гг. [<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/>].

Кроме того, в данной работе использовалась глобальная база данных GODAS (Глобальная система ассимиляции океанических данных), которая основана на квазиглобальной конфигурации GFDL MOM.v3 (Модульная модель океана Лаборатории геофизической гидродинамики). Область модели простирается от 75° ю.ш. до 65° с.ш. и имеет разрешение 1° × 1°, увеличенное до 1/3° с севера на юг в пределах 10° от экватора. На акватории ПА выделено 216 точек участка сетки, для которых из базы данных GODAS были выбраны среднемесячные

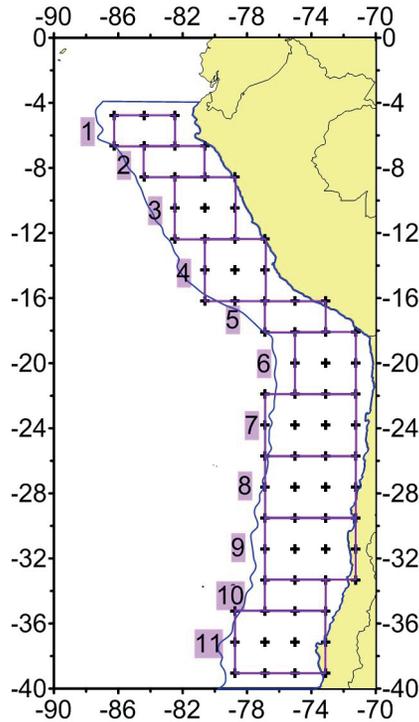


Рис. 1. Схема области Перуанского апвеллинга.

Для одиннадцати выделенных прямоугольников выполнялся расчет индекса апвеллинга.

Fig. 1. Scheme of the Peruvian upwelling region.

The upwelling index was calculated for 11 selected rectangles.

значения температуры поверхности океана (ТПО) за период 1980–2020 гг. [http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/Reanalysis_Data/GODAS/monthly/].

В соответствии с работой [14] рассмотрим кратко методику оценки интенсивности процесса апвеллинга. С этой целью воспользуемся уравнением водного баланса верхнего слоя океана, которое запишем следующим образом:

$$\partial V / \partial t + \text{div}F_w = P - E + \xi_z, \quad (1)$$

где первый член слева означает изменение объема этого слоя, второй член — результирующий отток (приток) горизонтального потока массы. Справа разность $P - E$ (осадки минус испарение) означает приток влаги через поверхность океана, а величина ξ_z — поток водной массы через нижнюю границу z выделенного верхнего слоя океана. При этом поток вверх (внутри слоя) принимается со знаком «плюс», а поток вниз — со знаком «минус». В качестве z в соответствии с теорией Экмана примем границу трения D . Схематично составляющие уравнения баланса для района апвеллинга представлены на рис. 2.

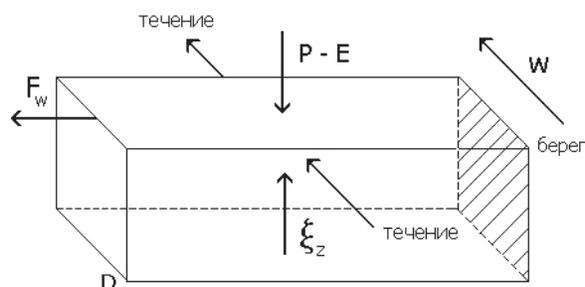


Рис. 2. Схема водных потоков в верхнем слое океана до глубины трения D в области апвеллинга.

Fig. 2. Scheme of water flows in the upper layer of the ocean to friction depth D in the upwelling region.

Естественно, что величиной $\partial V / \partial t$ в уравнении (1) можно пренебречь, поскольку области апвеллингов являются открытыми, вдобавок, влагообмен через поверхность океанов является малой величиной по сравнению с $div F_w$. Отсюда следует, что вертикальный поток водной массы ξ_z уравнивается ее результирующим горизонтальным потоком, т. е.

$$div F_w = \xi_z, \quad (2)$$

По существу величина ξ_z и представляет индекс апвеллинга. Поскольку непосредственное определение вертикальных потоков воды весьма сложно, то воспользуемся косвенным методом. Так как величина $div F_w$ обычно представляет малую разность больших величин, то ее оценка через производные в заданной каким-либо образом сеточной области представляется нецелесообразной. Воспользуемся формулой Остроградского-Гаусса, которая позволяет рассчитывать значения дивергенции через горизонтальные потоки массы, перпендикулярные к контуру некоторого выделенного участка области апвеллинга:

$$div F_w = \frac{1}{A} \int_L F_n dL, \quad (3)$$

где L — периметр контура, стягивающего площадь A , F_n — поток массы, нормальный к контуру.

Отсюда следует, что осредненная по площади величина дивергенции горизонтального потока массы в верхнем слое океана по сути является индексом апвеллинга. Представим теперь формулу (3) в конечных разностях в виде:

$$IA = div F_w = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^n l_j \frac{(F_j + F_{j+1})}{2}, \quad (4)$$

где l_j — расстояние между двумя соседними (j и $j + 1$) точками на внешней границе области апвеллинга, F_j и F_{j+1} — вертикально-интегрированные горизонтальные

потоки водной массы в точках j и $j + 1$, нормальные к контуру. Тогда в зависимости от ориентации граней контура в пространстве (по параллели или по меридиану) поток массы может быть зональным (F_{wx}) или меридиональным (F_{wy}).

Достаточно очевидно, что основной вклад в формирование циркуляции верхнего слоя океана вносят дрейфовые течения. В качестве косвенной оценки их интенсивности ограничимся экмановским переносом. Как известно из теории Экмана, полный поток массы дрейфового течения F_{wxy} направлен под углом 90° от направления ветра вправо в северном полушарии и влево в южном полушарии. В этом случае его зональная и меридиональная компоненты могут быть вычислены по формуле:

$$F_{wx} = \frac{V_o D \rho \sqrt{2}}{2\pi} = \frac{\tau_v}{2\Omega \sin \varphi}, F_{wy} = \frac{V_o D \rho \sqrt{2}}{2\pi} = \frac{\tau_u}{2\Omega \sin \varphi}, \quad (5)$$

где V_o — скорость течения на поверхности, направленная под углом 45° к направлению ветра, ρ — средняя плотность воды, D — глубина слоя трения, τ_u и τ_v — зональная и меридиональная компоненты касательного напряжения скорости ветра, Ω — угловая скорость вращения Земли, φ — широта. Величина $\tau_{u,v}$ определяется следующим образом:

$$\tau_u = \rho_a C_d u^2, \quad \tau_v = \rho_a C_d v^2, \quad (6)$$

где ρ_a — средняя плотность воздуха, u и v — зональная и меридиональная компоненты скорости ветра, C_d — коэффициент трения, для оценки которого при стратификации, близкой к нейтральной, может быть принята линейная зависимость от средней скорости ветра [23]:

$$C_d = (a + b\bar{V}) \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

В этой же работе содержится довольно подробный обзор возможных параметризаций C_d . Нами было принято $a = 0,63$, $b = -0,066$. Отметим, что глубина экмановского слоя D определялась по известной формуле:

$$D = \pi \sqrt{\frac{\mu}{\rho \sin \varphi}}, \quad (8)$$

где $\mu = 0,43W^2$ — динамический коэффициент турбулентной вязкости (W — модуль скорости приводного ветра).

Итак, зональная компонента дрейфового потока массы рассчитывается по меридиональной компоненте скорости ветра, а величина F_{wy} — наоборот, по зональной компоненте ветра. Заметим, что в работах [24, 25] в качестве индекса прибрежного апвеллинга предложено использовать величину $ИПА = \frac{\tau_v}{2\Omega \sin \varphi}$, которая рассчитывается по ветру, параллельному берегу. Нетрудно видеть, что ИПА является частным случаем ИА и позволяет учитывать лишь локальную интенсивность апвеллинга.

Результаты расчетов и их обсуждение

Для одиннадцати выделенных районов в области ПА были рассчитаны среднемесячные значения ИА за 1980—2020 гг. На рис. 3 приводится внутригодовая изменчивость глубины трения и индекса апвеллинга, осредненных для всей области ПА. Средняя многолетняя величина глубины трения D составляет 67 м, а ИА — 470 мм/мес. Максимум глубины трения отмечается в ноябре (74 м), а минимум в мае (64 м). Отсюда видно, что амплитуда колебаний примерно 15 % от среднего значения. Можно также отметить, что подобный внутригодовой ход ИА отмечается во всех выделенных районах, причем в южных районах амплитуда его выше, а в северных — ниже. Индекс апвеллинга меняется в диапазоне от 280 мм/мес (февраль) до 580 мм/мес (июнь). Амплитуда его колебаний составляет около 63 % от $X_{\text{ср}}$, т. е. внутригодовая изменчивость ИА в 4 раза выше изменчивости D .

Рассмотрим межгодовую изменчивость этих параметров. В табл. 1 приводятся первичные статистики ($X_{\text{ср}}$, коэффициент вариации C) и характеристики линейного тренда (угловой коэффициент a_1 и коэффициент тренда R^2). Нетрудно увидеть, что глубина трения уменьшается по направлению к Антарктике почти в 4 раза. Причиной этого является значительный рост $\sin\varphi$ в формуле 8. Отметим также, что в значениях D проявляется хорошо выраженная циркумконтинентальная зональность, поскольку изолинии D с увеличением в сторону открытого океана практически параллельны береговой черте. Амплитуда меридиональной изменчивости D в пределах ПА составляет 79 м, что превышает ее среднее значение. Однако межгодовая изменчивость значений D невелика (в пределах 10 %), причем мало меняется от района к району. Тренды для большинства районов положительные, что означает увеличение глубины трения. Тренды присутствуют почти во всех выделенных районах. Значимость трендов (вклад в дисперсию функции отклика) оценивается по коэффициенту детерминации. Критическое

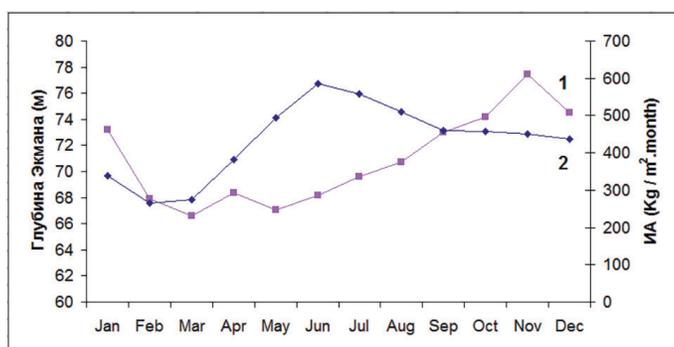


Рис. 3. Внутригодовая изменчивость глубины трения (1) в м и индекса апвеллинга (2) в (мм/мес) для всей области ПА.

Fig. 3. Intra-annual variability of friction depth (1) in m and upwelling index (2) in (mm/month) for the entire Peruvian upwelling region.

значение R^2 на уровне значимости по критерию Стьюдента 0,05 определяется по формуле $R^2_{кр} = 4/(n + 2)$. При $n = 40$ $R^2_{кр} = 0,093$, $r_{кр} = 0,33$. Итак, значимые тренды отмечаются в центральных районах ПА (районы 4 – 8).

Таблица 1

Оценки первичных статистик (X_{cp} , коэффициент вариации С) и характеристик линейного тренда (угловой коэффициент a_1 и коэффициент тренда R^2) для 11 районов ПА за 1980—2020 гг.

Estimates of primary statistics (X_{cp} , coefficient of variation С) and linear trend characteristics (angular coefficient a_1 and trend coefficient R^2) for 11 regions of the Peruvian upwelling for 1980–2020.

Район	Глубина слоя Экмана (м)				Индекс апвеллинга (мм/мес)			
	X_{cp}	С (%)	Тренд	R^2	X_{cp}	С (%)	Тренд	R^2
1	120,22	10,15	0,0064	0,001	-539,6	78,55	20,7260	0,343
2	110,23	8,50	-0,0095	0,001	275,0	118,30	5,5470	0,042
3	93,03	6,69	-0,0004	0,001	630,7	42,77	-0,1165	0,001
4	88,99	5,03	0,1857	0,247	272,9	67,55	0,9825	0,001
5	68,06	5,73	0,1312	0,162	464,6	55,00	8,7924	0,170
6	63,86	7,87	0,2143	0,261	554,6	24,42	0,2381	0,001
7	65,05	10,36	0,4060	0,521	344,5	24,88	-3,4660	0,235
8	51,04	7,71	0,2137	0,423	545,3	12,23	3,1281	0,315
9	41,03	7,64	0,0695	0,070	545,4	14,03	2,9893	0,219
10	41,67	9,54	0,0786	0,056	587,9	19,43	1,5346	0,026
11	36,59	6,07	0,0493	0,071	427,5	11,79	-1,2510	0,088

В отличие от глубины трения индекс апвеллинга не имеет хорошо выраженной меридиональной изменчивости, которая носит в основном случайный характер. Максимум ИА отмечается в районе 3, о котором также упоминается в работе [26], причем по обе стороны от него в районах 2 и 4 он, наоборот, минимален. Что касается межгодовой изменчивости ИА, то, напротив, она намного выше, чем в D. В большинстве районов коэффициент вариации ИА в разы выше, чем С в D. Максимальная изменчивость наблюдается в районе 2, где она превышает 100 %. Это связано с аномально низкой величиной X_{cp} ИА. Исключая два северных района, тренд в ИА является положительным, т. е. в целом апвеллинг усиливается. При этом значимые тренды преимущественно сосредоточены в южных районах ПА. Максимальный тренд наблюдается в районе 5.

В табл. 2 приводится корреляция между индексом апвеллинга и глубиной трения. Нетрудно увидеть, что за исключением 8 района, в других районах ПА корреляция между этими параметрами оказывается отрицательной: при уменьшении глубины трения происходит увеличение вертикальной скорости воды, что приводит к возрастанию вверх потока водной массы и, соответственно, ИА. Наиболее ярко связь между этими параметрами проявляется в районе 7, где корреляция достигает $r = -0,85$. Кроме того, в табл. 2 представлена корреляция значений D и ИА с ТПО в центре каждого района. Корреляция между ИА и ТПО в большинстве

районов отрицательная. Это означает, что при возрастании потока более холодных водных масс вверх к поверхности температура океана понижается.

Более сложный характер связи имеет место между ТПО и D. С понижением ТПО повышается плотность морской воды, в результате чего усиливается конвекция, которая, вероятно, увеличивает глубину трения. Поэтому должна отмечаться преимущественно отрицательная корреляция между ТПО и D, однако вследствие сложности указанного процесса она является значимой лишь в четырех районах южной части ПА. Итак, все виды связи между параметрами ТПО, ИА и D имеют довольно четкую физическую обусловленность, что позволяет считать корреляцию между ними достоверной.

Таблица 2

Оценки коэффициентов корреляции между индексом апвеллинга, глубиной трения и ТПО для одиннадцати районов Перуанского апвеллинга за период 1980—2020 гг.

Значимые коэффициенты корреляции выделены полужирным шрифтом.

Estimates of correlation coefficients between the upwelling index, friction depth and SST for 11 regions of the Peruvian upwelling for the period 1980–2020.

Significant correlation coefficients are highlighted in bold.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$r(D, IA)$	-0,05	-0,29	-0,69	-0,22	-0,34	-0,60	-0,85	0,45	-0,25	-0,70	-0,22
$r(ТПО, IA)$	-0,07	-0,41	-0,39	-0,50	-0,38	-0,03	0,48	-0,41	-0,13	0,21	-0,04
$r(D, ТПО)$	-0,12	0,02	0,23	-0,16	-0,14	-0,34	-0,66	-0,69	-0,43	-0,31	-0,20

Заключение

Перуанский апвеллинг относится к числу четырех наиболее высокопродуктивных районов апвеллинга в Мировом океане и является крупнейшим по уловам рыбы. Крупный промысел мелких пелагических видов рыбы в значительной степени поддерживается процессом апвеллинга, который способствует формированию высокой биологической продуктивности вод. В статье впервые рассматривается оценка интенсивности апвеллинга с использованием теории Экмана в области ПА за период 1980—2020 гг. Вертикальный поток водной массы через границу глубины трения принят в качестве индекса апвеллинга (ИА). Предложена методика расчета ИА по зональной и меридиональной компонентам скорости ветра в приводном слое океана. Основой для расчетов составляющих ветра послужил архив NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (Reanalysis-2). Были рассчитаны статистические характеристики меридиональной и межгодовой изменчивости глубины трения, индекса апвеллинга для одиннадцати выделенных районов ПА. Показано, что для большинства районов ПА отмечаются положительные тренды в глубине трения и ИА. Это означает увеличение глубины трения и усиление апвеллинга. Выявлена отрицательная корреляция между ИА и глубиной трения для большинства районов ПА, а также между ТПО и D, между ИА и ТПО. Все виды связи между этими параметрами имеют четкую физическую обусловленность, что позволяет считать корреляцию между ними достоверной.

Список литературы

1. Bakun A., Weeks S. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? // *Progress in Oceanography*. 2008. Vol. 79, P. 290—299. DOI: 10.1016/j.pocan.2008.10.027.
2. Heileman, S., Guevara R., Chavez F., et al. Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas. eds K. Sherman, G. Hempel. XVII-56 Humboldt current: LME 13, in The United Nations Environment Programme Large Marine Ecosystem (UNEP-LME), (Nairobi: United Nations Environment Programme). 2009. 15 p.
3. Gutiérrez D., Akester M., Naranjo L. Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change // *Environmental Development*. 2015. Vol. 17, P. 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004.
4. Karstensen J., Ulloa O. Peru–Chile Current System // *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009. P. 385—392. DOI: 10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
5. Ramos J. E., Tam J., Aramayo V., et al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. № 1. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5.
6. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том I. Изменчивость факторов среды обитания. СПб.: РГГМУ, 2009. 278 с.
7. Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973 // *Cah. O.R.ST.O.M., Sér. Océanogr*. 1974. Vol. 12. № 3. P. 187—201.
8. Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa // *Rapports et Proces-verbaux des Réunion. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1982. Vol. 180. P. 148—183.
9. Bakun A., Field D., Redondo-Rodriguez A., Weeks S. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16, 1213—1228. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
10. Bakun A., Black B., Bograd S., et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. // *Current Climate Change Reports*. 2015. Vol. 1. P. 85—93. doi: 10.1007/s40641-015-0008-4.
11. Espinoza-Morriberon, D., Echevin V., Colas F., et al. Impacts of El Nino events on the Peruvian upwelling system productivity // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 5423—5444, doi:10.1002/2016JC012439.
12. Castillo R., Dalla L., Garcia W., et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017 // *Fisheries Oceanography* 2019. Vol. 28. P. 389—401. doi:10.1111/fog.12419.
13. FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation. FAO – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022. 266 p. – ISBN 978-92-5-136364-5 Text (visual): immediate.
14. Малинин В. Н., Чернышков П. П., Гордеева С. М. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды / В.Н. Малинин, П.П. Чернышков, С.М. Гордеева. СПб: Гидрометеоиздат. 2002. 156 с.
15. Духова Л. А., Сапожников В. В. Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов // *Водные биологические ресурсы. Труды ВНИРО*, 2014. Том 152, С. 85—100.
16. Сапожников В. В., Чернышков П. П., Шнар В. Н. и др. Комплексные исследования пелагической экосистемы района Канарского апвеллинга на СТМ «Атлантида» в июле-августе 2006 г. // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 3. С. 473—476.
17. Wooster W. S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic // *Journal of Marine Research*. 1976. Vol. 34. № 2. P. 131—141.
18. Nykjær L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along north-west Africa and Portugal from 1981 to 1991 // *Journal of Geophysical Research*. 1994. Vol. 99. C7. P. 14197—14207.
19. Demarcq H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to Octopus vulgaris recruitment // *Oceanologica Acta*. 2000. Vol. 23. № 4. P. 391—408. doi: 10.1016/S0399-1784(00)01113-0.

20. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946—71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Technical Report NMFS SSRF-671. 1973. 103 p.
21. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al., NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. American Meteorological Society*. 2002. V. 83. No. 11. P. 1631—1644. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
22. Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. // *Ecological Studies*. 2001. Vol. 144. P. 229—244. doi: 10.1007/978-3-662-04482-7_17.
23. Братсерт У. Х. Испарение в атмосфере: Теория, история, приложения. Л., Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
24. Richards F. A. Coastal Upwelling. F. A. Richards, Ed., *Coastal Estuarine Science*, American Geophysical Union, Washington DC, Vol. 1. 1981. 215 p. <http://dx.doi.org/10.1029/CO001>.
25. Robert J.P. Aperçu sur l'hydrologie du plateau continental ouest-africain de la Mauritanie a la Guinee / Rapport du groupe de travail ad hoc sur les poissons pélagiques cotiers ouest-africains de la Mauritanie au Liberia (26°N a 5°N). COPACE / PACE Series 78 / 10 (Fr.): 92-97 (annexe 9).
26. Elipot S., Gille S. Ekman layers in the Southern ocean: spectral models and observations, vertical viscosity and boundary layer depth. *Ocean Science*. 2009; (5): 115—139. DOI: 10.5194/OS-5-115-2009.
27. Soto-Mardones L., Parés-Sierra A., Durazo R. Ekman modulation of the sea-surface temperature on the Eastern South Pacific // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004. Vol. 51, N°6—9, P. 551—561. doi: 10.1016/j.dsr2.2003.06.006.

References

1. Bakun A., Weeks S. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? *Progress in Oceanography*. 2008; 79(2—4): 290—299. DOI: 10.1016/j.pcean.2008.10.027.
2. Heileman, S., Guevara R., Chavez F., et al. Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas. eds K. Sherman, G. Hempel. XVII-56 Humboldt current: LME 13, in *The United Nations Environment Programme Large Marine Ecosystem (UNEP-LME)*, (Nairobi: United Nations Environment Programme). 2009: 15 p.
3. Gutiérrez D., Akester M., Naranjo L. Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change. *Environmental Development*. 2015; (17): 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004.
4. Karstensen J., Ulloa O. Peru–Chile Current System. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009: 385—392. DOI: 10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
5. Ramos J. E., Tam J., Aramayo V. et al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System. *Scientific Reports*. 2022. 12(1), 6584. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5.
6. Malinin V.N., Гордеева S.N. *Promyslovaya okeanologiya yugo-vostochnoj chasti Tikhogo okeana. T. 1. Izmenchivost' faktorov sredy obitaniya = Fishery oceanology of south-east Pacific Ocean. Volume I. Variability of environmental factors*. St. Petersburg: RSHU, 2009: 278 p. (in Russ.).
7. Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973. *Cah. O.R.ST.O.M., Sér. Océanogr.* 1974; 12(3), 187—201.
8. Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa. *Rapports et Proces-verbaux des Réunion. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1982; (180): 148—183.
9. Bakun, A., Field D., Redondo-Rodriguez A., Weeks S. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biology*. 2010; (16): 1213—1228. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
10. Bakun A., Black B., Bograd S., et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. *Current Climate Change Reports*. 2015; (1): 85—93. DOI: 10.1007/s40641-015-0008-4.
11. Espinoza-Morriberon D., Echevin V., Colas F., et al. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017; (122): 5423—5444. DOI: 10.1002/2016JC012439.

12. Castillo R., Dalla L., García W., et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017. *Fisheries Oceanography*. 2019; (28): 389—401. DOI: 10.1111/fog.12419.
13. *FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation*. FAO – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022: 266 p.
14. Malinin V., Chernyshkov P., Gordeeva S. *Kanarskiy apvelling: krupnomasshtabnaya izmenchivost' i prognoz temperatury vody = The Canarian upwelling: a Large-scale variability and forecast of water temperature*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 2002: 156 p. (in Russ.)
15. Dukhova L. A., Sapozhnikov V. V. Hydrochemical Indicators of Primary Production within the Peruvian and Canary Upwelling Areas. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*, 2014; (152): 85—100. (in Russ.)
16. Sapozhnikov V. V., Chernyshkov P. P., Schnar V. N. et al. Comprehensive studies of the pelagic ecosystem of the Canary upwelling region on the Atlantis STM in July-August 2006. *Okeanologia = Oceanology*. 2007; 47(3): 473—476. (in Russ.)
17. Wooster W. S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *Journal of Marine Research*. 1976; 34(2): 131—141.
18. Nykjær L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along north-west Africa and Portugal from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*. 1994; 99(C7): 14197—14207.
19. Demarcq H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to Octopus vulgaris recruitment. *Oceanologica Acta*. 2000; 23(4): 391—408. DOI: 10.1016/S0399-1784(00)01113-0.
20. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946—71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Tech. Rep., NMFS SRRF-671. 1973: 103 p.
21. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al., NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002; 83(11): 1631—1644. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
22. Tarazona J., Armtz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Ecological Studies. 2001. (144). *Springer, Berlin, Heidelberg*. DOI: 10.1007/978-3-662-04482-7_17.
23. Bratsert W. H. Evaporation into the atmosphere: Theory, history, applications. L., Gidrometeoizdat, 1985: 351 p (in Russ.).
24. Richards F. A. Coastal Upwelling. F. A. Richards, Ed., Coastal Estuarine Science, American Geophysical Union, Washington DC. 1981. (1): 215 p. <http://dx.doi.org/10.1029/CO001>.
25. Robert J. P. Aperçu sur l'hydrologie du plateau continental ouest-africain de la Mauritanie a la Guinee. Rapport du groupe de travail ad hoc sur les poissons pélagiques cotiers ouest-africains de la Mauritanie au Liberia (26°N a 5°N). COPACE / PACE Series 78 / 10 (Fr.): 92-97 (annexe 9).
26. Elipot S., Gille S. Ekman layers in the Southern ocean: spectral models and observations, vertical viscosity and boundary layer depth. *Ocean Science*. 2009; (5): 115—139. DOI: 10.5194/OS-5-115-2009.
27. Soto-Mardones L., Parés-Sierra A., Durazo R. Ekman modulation of the sea-surface temperature on the Eastern South Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004; 51(6—9): 551—561. DOI: 10.1016/j.dsr2.2003.06.006.

Информация об авторах

Джимми Хуан Мартина-Васкес, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, jimmymartinavasquez@gmail.com.

Светлана Михайловна Гордеева, кандидат геогр. наук, доцент, доцент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, gordeeva@rshu.ru.

Валерий Николаевич Малинин, доктор геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

Information about authors

Jimmy Juan Martina Vásquez, PhD student of the Russian State Hydrometeorological University.

Svetlana Mikhailovna Gordeeva, PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Associate Professor.

Valery Nikolaevich Malinin, PhD Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Professor.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 04.04.2024

Принята к печати после доработки 24.05.2024

The article was received on 04.04.2024

The article was accepted after revision on 24.05.2024