ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

НИЗКОЧАСТОТНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЯ ВЕТРА В ОБЛАСТИ ЧИЛИЙСКОГО АПВЕЛЛИНГА

© 2024 г. А. Б. Полонский^{1,} *, А. Н. Серебренников¹

¹ФГБНУ "Институт природно-технических систем", Севастополь, Россия *E-mail: apolonsky5@mail.ru Поступина в родокцию 22.03.2024 г.

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

В статье анализируется влияние изменения скорости и направления приповерхностного ветра (ПВ) в северной и южной частях Чилийского апвеллинга (ЧА) на межгодовую и междекадную изменчивость экмановского индекса апвеллинга. Использованы спутниковые данные за период 1988–2022 гг. Показано, что усиление скорости ветра в северной части ЧА на протяжении 1997–2003 гг. в основном сопровождалось таким изменением направления ПВ в прибрежной зоне, которое благоприятствует интенсификации апвеллинга. Для других периодов (за исключением отдельных лет) такая закономерность не была характерна. В целом, изменение скорости ветра в северной части ЧА в несколько большей степени влияет на изменение индекса апвеллинга, чем изменение направления ПВ. В южной части ЧА изменение экмановского индекса апвеллинга в большей степени определяется изменением скорости ПВ. Обсуждается роль динамики субтропического максимума атмосферного давления в юго-восточной части ЧА. Выявлено, что долгопериодная изменчивость скорости ветра в апвеллинговой зоне реализуется в виде параболического тренда. Его можно интерпретировать как проявление мультидекадного колебания, период которого оценивается в 65–70 лет, что совпадает с типичным периодом Атлантической мультидекадной осцилляции.

Ключевые слова: экмановский индекс апвеллинга, центр масс, скорость и направление приповерхностного ветра, субтропический максимум давления, межгодовая и междекадная изменчивость

DOI: 10.31857/S0205961424060085, EDN: RQNICG

введение

Апвеллинг у западных берегов Америки и Африки, обусловленный главным образом прибрежными ветрами, направленными к экватору, является доминирующим физическим процессом, вызывающим высокую биологическую продуктивность восточных частей Тихого и Атлантического океанов. Эти регионы, характеризуемые интенсивными восходящими движениями в верхнем слое океана, образуют так называемую систему восточных пограничных апвеллингов (Eastern Boundary Upwelling System, EBUS). Одна из самых продуктивных в мире прибрежных зон приурочена к Чилийскому апвеллингу (ЧА), входящему в EBUS (Carr, Kearns, 2003; Patti et al., 2008; Pinochet et al., 2019). Согласно статистике Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, этот апвеллинг отвечает за особо высокопродуктивную рыбохозяйственную деятельность в экономической зоне Чили (FAO, 2016).

В последние 35 лет в нескольких публикациях отмечалась систематическая долговременная интенсификация прибрежных апвеллингов EBUS вслед-

96

ствие глобального потепления (Bakun, 1990; Schwing and Mendelssohn, 1997; Varela et al., 2015; Aguirre et al., 2018; Ovarzún and Brierley, 2019; Abrahams et al., 2021). Увеличение интенсивности и продолжительности апвеллингов может повлиять на широкий спектр экологических и биологических процессов, в частности, через изменения химического состава воды, связанное с расширением зоны кислородного минимума вдоль восточных окраин Тихого и Атлантического океанов (Muñoz, 2023). Однако в других работах высказывается иная точка зрения на долгосрочные тенденции EBUS (в том числе, и ЧА). В них отмечается, что долговременная интенсификация EBUS сопровождается интенсивными междесятилетними (междекадными) и межгодовыми вариациями апвеллинга естественного происхождения. Это приводит к отсутствию значимой положительной тенденции в интенсивности апвеллинга в некоторые десятилетия или даже к смене знака тренда на противоположный в периоды, когда происходит ослабление подъема вод естественного происхождения (Bakun et al., 2015; Tim et al., 2015; Polonsky, Serebrennikov, 2020; Bordbar et al., 2021; Polonsky, Serebrennikov, 2022; Garc'ıa-Reyes, 2023).

В настоящей работе проанализированы многолетние тенденции, межгодовые и междесятилетние вариации поля ветра в области ЧА, определяющие пространственно-временные характеристики ветрового апвеллинга, с использованием спутниковых данных. В силу большой протяженности по широте ЧА разделен на две части, каждая из которых характеризуется своими климатическими особенностями, а именно: на северный Чилийский апвеллинг (СЧА), расположенный между 30° и 18° ю.ш., и южный Чилийский апвеллинг (ЮЧА), простирающейся к югу от 30° ю.ш. и до 42° ю.ш. (рис. 1).

Интенсивность ЧА в значительной степени зависит от положения субтропической области повышенного давления в юго-восточной части Тихого океана (Southeast Pacific Subtropical Anticyclone, SPSA), которая контролирует ветры вдоль побережья Южной Америки (Fuenzalida et al., 2008; Ancapichún et al., 2015). В осенне-зимний период Южного полушария SPSA располагается в более низких широтах – его центр находится между 27° и 29° ю.ш., что создает благоприятные условия для усиления СЧА. Весной и летом SPSA смещается к югу и его центр обнаруживается в широтной полосе 30-33° ю.ш. (Pinochet et al., 2019). Это создает условия, благоприятные для интенсификации ЮЧА (Bello et al., 2004; Aguirre et al., 2012; Strub et al., 2019; рис.1).

Временные ряды вертикальной компоненты вектора течений, рассчитанные по полям ветра в восточной части Тихого океана и приведенные в работе (Polonsky, Serebrennikov, 2021), показывают общую тенденцию усиления ЧА в промежутке между 1988 и 2002 гг. Причем основная доля общей интенсификации апвеллинга приходилась на усиление экмановских дрейфовых течений и компенсирующее восходящее движение подповерхностных вод. Из результатов этой работе следует, что с 2003 г. устойчивая интенсификация ЧА прекратилась. Полчеркивалось наличие высокоамплитулных межгодовых-междекадных изменений скорости подъема вод в области обеих частей ЧА. Это доказывает важную роль естественных вариаций в поле ветра в формировании изменчивости интенсивности ЧА. Причем, междекадные климатические вариации сопровождаются смещением субтропических центров действия атмосферы и сопутствующим изменением вдольбереговой компоненты ветра (Вершовский, Кондратович, 2007; Polonsky, Serebrennikov, 2020; 2021; 2022). А это, в свою очередь, влияет на интенсивность ЧА (Schneider et al., 2017). Таким образом, возникают два следующих вопроса:

• в какой степени изменение интенсивности сгонных ветров в области ЧА является следствием усиления ветра, а в какой — вызвана разворотом векторов ветра в прибрежной зоне из-за пространственного смещения субтропического максимума давления в юго-восточной части Тихого океана?



Рис. 1. Среднемесячная меридиональная компонента приповерхностного ветра, рассчитанная по спутниковым данным за январь 2020 г., когда апвеллинг максимально развит в ЮЧА (*a*) и за июнь 2020 г., когда он наиболее интенсивен в СЧА (δ).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 6 2024

 какова основная причина долгопериодных вариаций интенсивности сгонных ветров в области ЧА?

В настоящей статье эти вопросы обсуждается применительно к СЧА и ЮЧА с использованием массива спутниковых данных о поле ветра с 1988 по 2022 гг. Ее можно рассматривать как продолжение работы (Polonsky, Serebrennikov, 2022), в которой аналогичные вопросы изучались для области Бенгельского апвеллинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

В работе использовались спутниковые данные о приповерхностном ветре ССМР ОСW (Сгоss-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind) за период с 1988 по 2022 гг. Причем для первого, 27-летнего периода (с 1988 по 2014 гг.) использовалась версия v.2.0, REP (уточненные данные), а для следующего, 8-летнего периода (с 2015 по 2022 гг.) – версия v.2.1, NRT (данные в близком к реальному времени). Данные получены из архива PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), NASA (Remote Sensing Systems, 2023). Пространственное разрешение этих данных по широты и долготе составляет $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. Временное разрешение – 6 часов.

Параметры усредненного суточного экмановского переноса рассчитывались для каждой точки прибрежной области ЧА. Ширина области апвеллинга выбиралась из условия ее близости к бароклинному радиусу деформации Россби для рассматриваемого региона. С учетом пространственного разрешения имеющихся данных ширина области для расчета ветровых параметров апвеллинга была принята равной 1°. Среднесуточный экмановский перенос в прибрежной зоне рассчитывался как среднее значение на каждой широте с использованием среднесуточных значений экмановского дрейфового потока в узлах координатной сетки.

Среднемесячные данные о приземном давлении для юго-восточной части Тихого океана за период с 1988 по 2022 гг. были получены из базы ре-анализа ERA5 ("ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present", Climate Data Store, 2023) и использовались для анализа межгодовой и междекадной изменчивости характеристик субтропического центра высокого давления в юго-восточной части Тихого океана. Пространственное разрешение этих данных по широты и долготе составляет 0.25° × 0.25°.

Отметим, что мы сознательно не использовали данные ре-анализа ERA5 по ветру в прибрежной зоне, которые доступны за значительно больший промежуток времени чем спутниковые данные. Это связано с тем обстоятельством, что при анализе

пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических полей с использованием длительных данных ре-анализа, включая ERA5, возникает следующая, достаточно хорошо известная проблема. Из-за принципиального изменения количества и качества усваиваемых данных наблюдений, особенно выраженной с начала спутниковой эры, практически невозможно разделить естественные вариации анализируемых параметров и изменчивость, обусловленную развитием и трансформашией наблюдательной системы. поставляющей данные для ассимиляции. Именно по этой причине были выполнены ре-анализы 20-го столетия, в которых усваивалось минимальной количество данных наблюдений, выполняемых практически на неизменной методической основе, начиная с 19-го века. К сожалению, эти ре-анализы мало пригодны для анализа изменчивости поля ветра в зоне Чилийского апвеллинга по нескольким причинам (в первую очередь, из-за низкого пространственного разрешения и очень малого количества высококачественных метеорологических измерений в исследуемом регионе).

Сравнительный анализ различных спутниковых данных о ветре, используемых для оценки многолетних тенденций крупнейших тихоокеанских апвеллингов (Чилийского, Перуанского и Калифорнийского), выполнен в работе (Polonsky, Serebrennikov, 2021). Он показал, что выбранный здесь массив поля ветра, доступный с 1988 г., достаточно хорошо описывает межгодовые-междекадные вариации экмановского сгона в области ЧА. Что касается вертикальных движений, связанных с завихренностью поля ветра, то они в настоящей работе анализироваться не будут из-за их относительно небольшого вклада в суммарную вертикальную скорость в области ЧА (Polonsky, Serebrennikov, 2021).

Величины экмановского транспорта (переноса) в зоне ЧА зависят как от угла между вектором касательного напряжения трения ветра и линией берега, так и от скорости ветра, определяющей величину модуля этого вектора. Угол наклона береговой линии отсчитывается от параллели, ориентированной с запада на восток, в направлении против хода часовой стрелки. Средний угол наклона береговой линии для СЧА составляет 77.6°, для ЮЧА – 80.7°. Эти углы являются наиболее благоприятными для развития сгонного апвеллинга.

Экмановский индекс апвеллинга (*EUI*) вычисляется из экмановского транспорта (*Q*), который создается вдольбереговой составляющей касательного напряжения ветра τ (Сгоррег et al., 2014). Зональная (τ_x) и меридиональная (τ_y) составляющие касательного напряжения ветра вычисляются по компонентам вектора ПВ с использованием соотношений, следующих из полуэмпирической теории

турбулентности. Для стандартной декартовой системы координат эти соотношения записываются следующим образом:

$$\tau_{\mathbf{x}} = \rho_{\mathbf{a}} \times C_d \times (U^2 + V^2)^{1/2} \times U$$

$$\tau_{\mathbf{v}} = \rho_{\mathbf{a}} \times C_d \times (U^2 + V^2)^{1/2} \times V, \qquad (1)$$

где U и V – зональная и меридиональная компоненты ветра на высоте 10 м соответственно; ρ_a – плотность воздуха при стандартных условиях (1.22 кг м⁻³); C_d – безразмерный эмпирический коэффициент, типичное значение которого равно 1.3×10^{-3} (Schwing et al., 1996).

Зональная (Q_x) и меридиональная (Q_y) компоненты дрейфового транспорта, определяемые по классическим экмановским соотношениям, рассчитываются по следующим формулам:

$$Q_{x} = \tau_{y} / (\rho_{w} \times f)$$

$$Q_{y} = -\tau_{x} / (\rho_{w} \times f),$$

где ρ_w — плотность морской воды; f — параметр Кориолиса, равный 2 × Ω × sin(θ). Здесь Ω — угловая скорость вращения Земли, θ — географическая широта места.

Экмановский индекс апвеллинга *EUI* рассчитывается по формуле:

$$EUI = -Q_x \times \sin(\varphi) + Q_y \times \cos(\varphi), \qquad (2)$$

где Q_x и Q_y — зональная и меридиональная компоненты экмановского транспорта; ϕ — угол наклона береговой линии к параллели.

Согласно вышеприведенным формулам, индекс экмановского апвеллинга для фиксированной географической широты, на которой угол наклона береговой линии к параллели фиксирован, и при постоянных ρ_a , ρ_w и C_d определяется произведением компонент вектора приповерхностного ветра *U* и *V* на его модуль *W*, зависящий от *U* и *V* ($W = (U^2 + V^2)^{1/2}$). Таким образом изменчивость экмановского транспорта (переноса) зависит от изменчивости зональной (*U*) и меридиональной (*V*) компонент ПВ.

В полярной системе координат вектор приповерхностного ветра фактически характеризуется модулем (W) и направлением (A). Для анализа связи изменений экмановского индекса апвеллинга (EUI) с модулем вектора ПВ (W) и его направлением (A) за весь период с 1988 г. по 2022 г. использовалась стандартная методика вычисления центров масс (Center of mass, 2023). Применение методики расчета взаимных двумерных распределений различных параметров через центры масс позволяет наглядно продемонстрировать относительную роль изменения преобладающего направления вектора ветра и его модуля в вариациях экмановского индекса апвеллинга.

В настоящей работе центры масс рассчитывались для следующих пар взаимных распределений: W и EUI, A и EUI, A и W. В первой из этих пар по оси абсцисс откладывался модуль вектора ПВ, а по оси ординат — индекс экмановского апвеллинга; m_i точка на плоскости с координатами (x_i, y_i). Соответственно, центр масс распределений расположен в точке *m_i* с координатами (*x_c*, *y_c*). Во второй паре по оси абсцисс откладывается направление вектора ветра и т.д. Распределения рассчитываются для всех точек области предполагаемого апвеллинга на основания анализа среднесуточных векторов ПВ за каждый год и в целом за весь период наблюдений. Для примера на рис. 2 приведено взаимное распределение направления и модуля вектора ПВ для всего ЧА с центром масс в точке ($A = 94.6^{\circ}$, W = 5.5 м/с), полученное с использованием спутниковых данных за весь рассматриваемый период времени. Хорошо видно, что центр масс находится выше центра максимальной плотности распределения из-за наличия некоторого количества векторов, характеризующихся направлениями, сильно отличающимися от направления векторов, близких к центру масс. Это связано со значительной пространственно-временной изменчивостью поля ветра в области ЧА.

Сравнение временного хода полученных за каждый год характеристик позволяет в явном виде проиллюстрировать влияние изменений модуля и направления вектора ПВ на вариации интенсивности экмановского апвеллинга. Для более детального



Рис. 2. Взаимное распределение направления (*A*) и модуля вектора ПВ (*W*) за 1988 – 2022 гг., рассчитанное по ежедневным значениям для всего ЧА. Шкала под рисунком показывает относительную плотность распределения. Символом "•" показан центр масс (A= 94.6°, W= 5.5 м/с).

знакомства с методикой расчета центров масс для указанных пар переменных можно обратиться к работе (Polonsky, Serebrennikov, 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Взаимные распределения экмановского индекса апвеллинга с модулем вектора приповерхностного ветра за весь период исследования, построенные по ежедневным векторам для обеих частей ЧА (рис. не приведен), показывает, что центр масс этого распределения для СЧА/ЮЧА характеризуется следующими величинами (EUI=0.54 м²/с, W=4.9 м/с) / (EUI=0.59 м²/с, W=6.0 м/с). Другими словами, среднесуточная скорость ветра в зоне СЧА, соответствующая центру масс, составляет 4.9 м/с, а средняя (в верхнем 10-метровом слое) скорость сгонного течения – 5.4 см/с. Для ЮЧА имеем качественно похожую картину, но при несколько больших величинах скорости ветра (6.0 м/с) и сгонного течения в верхнем 10-метровом слое (5.9 см/с), отвечающих центру масс.

Координаты центров масс распределений EUI и W, рассчитанные за каждый год, существенно изменяются во времени. Из рис. 3 следует, что интенсивность апвеллинга подвержена высокоамплитудной изменчивости межгодового-междекадного масштаба, а линейный тренд является плохой аппроксимацией ее долгопериодных тенденций. В целом интенсификация апвеллинга происходила с 1996 по 2002 гг. (в СЧА) и с 1997 по 2003 гг. (в ЮЧА). Начиная с 2003-2004 гг., индекс апвеллинга, как и модуль вектора ПВ для всего ЧА перестали быстро увеличиваться. Тенденция изменения инлекса апвеллинга с 2003–2004 гг. близка к нулю. а модуля вектора ПВ при этом характеризуется отрицательной величиной тенденции в основном за счет последних трех лет. На рис. 3 (справа) видно, как резко упало значение EUI в ЮЧА в 1997

г., когда наблюдался один из самых интенсивных Эль-Ниньо за весь период инструментальных наблюдений. Причем, значение W адекватно не уменьшилось. Это значит, что в этот год резко изменилось направление ПВ в неблагоприятную для развития апвеллинга сторону.

Коэффициент ранговой корреляции по Кендаллу между ежегодными величинами EUI и W для СЧА равен 0.46, а для ЮЧА – 0.66. Отметим, что непараметрический метод ранговой корреляции Кендалла применен здесь, т.к. EUI и W распределены не по нормальному закону согласно тесту Шапиро–Уилка (Shapiro and Wilk, 1965), а размер выборки небольшой (n=35). Таким образом можно констатировать, что существует значимая корреляция между рассматриваемыми параметрами (EUI и W). Причем в южной части она выше, чем в северной.

Необходимо отметить следующую особенность долгопериодной изменчивости скорости ветра в области ЧА, хорошо видную на рис.3 и 4. Она заключается в наличии явно выраженного параболического тренда в скорости ветра, которую можно интерпретировать как проявление квазипериодического сигнала с периодом около 65-70 лет при вдвое меньшей длине анализируемого ряда (Полонский, Воскресенская, 2004). Доказательством реалистичности такой интерпретации служат результаты работы (Аверьянова, Полонский, 2024), в которой показано, что Атлантическая мультидекадная осцилляция с типичным периодом около 65 лет наиболее явно проявляется в потоках тепла на нижней границе атмосферы в западной части Южной Америки, примыкающей к области ЧА. Аналогичная долгопериодная изменчивость выделяется во временном ходе экмановского индекса апвеллинга и скорости ветра как в СЧА, так и в ЮЧА (рис. 3, 4).

Зависимость *EUI* от направления приповерхностного ветра (*A*) можно проследить на взаим-



Рис. 3. Межгодовые изменения координат центров масс взаимного распределения экмановского индекса апвеллинга (синяя кривая) и модуля вектора приповерхностного ветра за 1988 — 2022 гг., построенные по ежегодным данным для СЧА (слева) и ЮЧА (справа).

ном распределении последних для обеих частей ЧА апвеллинга (рис. 5). Средние за весь период коорди-указывают на близкую к благоприятному для развития апвеллинга величину направления сгонного ПВ (около 78°), который вызывает экмановское течение со средней скоростью (в верхнем 10-метровом слое) около 5.4 см/с. Изменения во времени (с точностью до года) центров масс этих распределений (рис. 5, слева), указывает на тот факт, что интенсификация апвеллинга, которая особенно быстро начала развиваться с 1996 г., происходила при более или менее устойчивом росте угла наклона вектора ПВ к береговой черте и приближении его к наиболее благоприятному для развития апвеллинга среднему углу. Таким образом, EUI вырос к 2002 г. как за счет увеличения W, так и за счет изменения направления ветра. Между временной изменчивостью EUI и A в зоне СЧА наблюдается корреляция по Кендаллу, равная 0.39. Примерно такая же корреляция была между вариациями *EUI* и W (0.46). Однако с 2005 и до 2015 гг. на изменения величины *EUI* в большей степени повлияла скорость (W), чем направление ПВ (сравните левые рис. 3 и 5).

Временной ход величины *EUI* и направления ПВ для ЮЧА указывает на тот факт, что он сильно отличается от соответствующего временного хода для СЧА. Средние за весь период координаты центра масс для ЮЧА (*EUI= 0.60 м²/с, A=113.6°*) свидетельствуют о том, что типичное направление ПВ в области ЮЧА существенно отличается от наиболее благоприятного для развития апвеллинга направления сгонного ПВ (около 81°). Естественно, что изменения во времени ежегодных центров масс этих распределений (рис. 5, справа) не коррелированы между собой— соответствующий коэффициент корреляции по Кендаллу незначим (составляет всего -0.08).



Рис. 4. Межгодовые изменения координат центров масс скорости ветра и параболические аппроксимирующие полиномы (показаны красным цветом) для СЧА (слева) и ЮЧА (справа). CD – коэффициент детерминации полиномиальной регрессии.



Рис. 5. Межгодовые изменения координат центров масс взаимного распределения *EUI* (синяя кривая) и направления ПВ (красная) за 1988 – 2022 гг., построенные по ежегодным данным для СЧА (слева) и ЮЧА (справа). Коэффициент корреляции между приведенными временными рядами для СЧА составляют 0.39, а для ЮЧА он незначим.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 6 2024



Рис. 6. Межгодовые изменения координат центров масс взаимного распределения направления (красная кривая) и модуля вектора приповерхностного ветра (синяя) за 1988 – 2022 гг., построенные по ежегодным данным для СЧА (слева) и ЮЧА (справа).

Таким образом, вариации направления вектора ветра в южной части апвеллинга практически не влияет на изменения экмановского индекса в отличие от скорости ветра (напомним, что коэффициент корреляции между *EUI* и *W* равен 0.66).

Центры масс распределений угла направления и модуля вектора ПВ для СЧА и ЮЧА в среднем для всего исследуемого периода характеризуются соответственно следующими величинами: ($A = 69.0^{\circ}$, W = 4.9 м/c) и ($A = 113.6^{\circ}$, W = 6.0 м/c). Межгодовые изменения координат центров масс взаимного распределения этих величин, построенные по ежегодным данным для СЧА и ЮЧА, показаны на рис. 6. Вариации этих параметров не коррелированы. Вместе с тем, хорошо видно существенное различие между относительно низкочастотными вариациями этих параметров для разных частей Чилийского апвеллинга. В СЧА с 1996 г. по 2002 г. скорость ветра (W) в целом росла, а в направлении ветра (A) преобладала межгодовая изменчивость. С 2007 г. величина A быстро росла, а W – в целом уменьшалась. В ЮЧА с 1992 г. по 2003 г. модуль скорости ветра быстро рос при не самых благоприятных для развития апвеллинга межгодовых колебаниях направления ветра в диапазон 102–123°.

Изменения ориентации вектора приводного ветра в области ЧА зависят от смещения субтропического максимума давления. Межгодовые вариации координат этого центра действия в большей мере определялись его смещениями по долготе (вдоль круга широты), а междесятилетние, напротив, по широте (рис. 7). Снова обращает на себя внимание год наиболее интенсивного Эль-Ниньо (1997 г.), когда отмечалось максимальное смещение центра действия атмосферы, особенно в зональном направлении. Что касается глубины субтропического



Рис. 7. Межгодовые изменения долготы (слева) и широты (справа) субтропического максимума давления в юго-восточной части Тихого океана.



Рис. 8. Межгодовые изменения среднегодового приземного давления в субтропическом максимуме юго-восточной части Тихого океана. Координаты исследуемого района: $-120^{\circ} \dots -70^{\circ}$ з.д. и $-52^{\circ} \dots$ -18° ю.ш. Период: 1988–2022 гг. Красным цветом показан параболический аппроксимирующий полином. CD – коэффициент детерминации этого полинома.

максимума давления, то она подвержена высокоамплитудным межгодовым колебаниям с абсолютным минимумом приводного давления в 1997 г., на фоне которых выделяется параболический тренд, отвечающий за 28% общей величины дисперсии приводного давления (рис. 8). Именно эти тенденции в значительной степени определили характер временных изменений экмановского сгона в области ЧА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные оценки показывают, что в северной части ЧА изменения модуля вектора ветра в несколько большей степени влияют на изменения величины экмановского индекса апвеллинга. чем изменения направления ПВ и немного лучше коррелированы с ними. Соответствующие коэффициенты корреляции равны 0.46 и 0.39. В южной части ЧА изменения индекса апвеллинга и направления ПВ не коррелированы между собой, а типичный интервал изменения величины А достаточно сильно отличается от наиболее благоприятного для развития апвеллинга значения. Скорость же ветра в ЮЧА коррелирует с индексом апвеллинга на уровне 0.66. Модуль вектора ветра в области ЧА подвержен низкочастотным (мультидекадным) вариациям с типичным периодом около 65-70 лет, совпадающим с типичным периодом Атлантической мультидекадной осцилляции.

Междекадная изменчивость интенсивности ЧА в значительной степени определяется смещениями в широтном направлении субтропического максимума давления в юго-восточной части Тихого океана и вариациями его глубины. На межгодовом масштабе важную роль играют смещения этого центра действия и по широте, и по долготе. Так, например, событие Эль-Ниньо 1997 г. резко ослабило ЮЧА не за счет уменьшения скорости, а за счет изменения направления приповерхностного ветра, вызванное смещением субтропического максимума давления как в широтном, так и в долготном направлениях. Причем смещение в зональном направлении было особенно выражено.

В заключение выражаем благодарность анонимному рецензенту за полезные замечания и предложения по доработке первого варианта статьи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы госзадания Института природно-технических систем "Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость морской среды и прилегающих территорий в широком диапазоне масштабов", госрегистрация № 124020100120-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аверьянова Е.А., Полонский А.Б. Исследование изменчивости турбулентных потоков тепла с использованием разложения на эмпирические ортогональные функции // Заключительный отчет по НИР "Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов", регистрационный № НИОКТР 121122300074-7. 2023. С. 19–27.

Вершовский М.Г., Кондратович К. В. Южно-тихоокеанский субтропический антициклон: интенсивность и локализация // Метеорология и гидрология. 2007. №12. С. 29–34.

Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н. О статистической структуре гидрометеорологических полей в Северной Атлантике // Морской гидрофизический журнал. 2004. №1. С. 14–25.

Abrahams A., Schlegel R.W., Smit A.J. Variation and Change of Upwelling Dynamics Detected in the World's Eastern Boundary Upwelling Systems // Front. Mar. Sci. 2021. V. 8. 626411. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.626411

Aguirre C., García-Loyola S., Testa G., Silva D., Farías L. Insight into anthropogenic forcing on coastal upwelling off south-central Chile // Elementa: Sci. Anthropocene. 2018. V. 6(1). 59. https://doi.org/10.1525/elementa.314

Aguirre C., Pizarro O., Strub P.T., Garreaud, R., Barth J.A. Seasonal dynamics of the near-surface alongshore flow off central Chile // J. Geophys. Res. Ocean. 2012. 117. https://doi. org/10.1029/2011JC007379

Ancapichún S., Garcés-Vargas J. Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile // Cienc. Mar. 2015. V. 41. P. 1–20.

Bakun A. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling // Science. 1990. V. 247. P. 198–201. https://doi.org/10.1126/science.247.4939.198

Bakun A., Black B.A., Bograd S.J., García-Reyes M., Miller A.J., Rykaczewski R.R., et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems // Curr. Clim. Change Rep. 2015. V. 1. P. 85–93. https://doi.org/10.1007/s40641-015-0008-4

Bello M., Barbieri M., Salinas S., Soto L. Surgencia costera en la zona central de Chile, durante el ciclo El Niño-La Niña 1997–1999. In El Niño-La Niña 1997–2000. // Sus Efectos en Chile. CONA, Chile, Valparaíso. 2004. P. 77–94.

Bordbar M.H., Mohrholz V., Schmidt M. The Relation of Wind-Driven Coastal and Offshore Upwelling in the Benguela Upwelling System // J. of phys. Oceanography, 2021. V. 51. P. 3117–3133. https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0297.1

Carr M.E., Kearns E.J. Production regimes in four Eastern Boundary Current systems // Deep Sea Res. 2003. Part II: Top. Stud. Oceanogr. V. 50. P. 3199–3221.

Center of mass, 2023. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ Center of mass (date of access: 10.12.2023).

Climate Data Store, 2023. URL: https://cds.climate.copernicus. eu/cdsapp (date of access: 10.12.2023).

Cropper T.E., Hanna E., Bigg G.R. Spatial and temporal seasonal trends in coastal upwelling off Northwest Africa, 1981–2012 // J. Deep-Sea Research. 2014. Part I. V. 86. P. 94–111. https:// doi.org/10.1016/j.dsr.2014.01.007

FAO. El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2016. Contribución a la Seguridad Alimentaria y la Nutrición Para Todos; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: Roma, Italia. 2016. 224 p.

Fuenzalida R., Schneider W., Garcés-Vargas J., Bravo L. Satellite altimetry data reveal jet-like dynamics of the Humboldt Current // J. Geophys. Res. Ocean. 2008. 113. https://doi.org/10.1029/2007JC004684

Garc'a-Reyes M., Koval G., Sydeman W.J., Palacios D., Bedriñana-Romano L., DeForest K., Montenegro Silva C., Sepu' lveda M. and Hines E. Most eastern boundary upwelling regions represent thermal refugia in the age of climate change // Front. Mar. Sci. 2023. V. 10. 1158472. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1158472

Muñoz R., Odette A.V., Pedro A.F., Piero M., Marcus S., Gonzalo S.S. On the phenology of coastal upwelling off central-southern Chile // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2023. V. 104. 101405. https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2023.101405

Oyarzún D., Brierley C. The future of coastal upwelling in the Humboldt current from model projections // Climate Dynamics. 2019. V. 52. Issue 1–2. P. 599-615. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4158-7

Patti B., Guisande C., Vergara A., Riveiro I., Maneiro I., Barreiro A., Bonanno A., Buscaino G., Cuttitta A., Basilone G. Factors responsible for the differences in satellite-based chlorophyll

a concentration between the major global upwelling areas // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2008. V. 76. P. 775–786. https://doi. org/10.1016/j.ecss.2007.08.005

Pinochet A., José G.-V., Carlos L., Francisco O. Seasonal Variability of Upwelling off Central-Southern Chile // Remote Sens. 2019. V. 11. 1737. https://doi.org/10.3390/RS11151737

Polonsky A.B., Serebrennikov A.N. 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. https://doi.org/10.1134/S0001433820090200

Polonsky A.B., Serebrennikov A.N. Influence of Different Satellite Data on Surface Winds on Coastal Upwelling. Part 2: Pacific Ocean // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. No. 12. P. 1670–1679. https://doi.org/10.1134/S0001433821120173

Polonsky A.B., Serebrennikov A.N. What is the Reason for the Multiyear Trends of Variability in the Benguela Upwelling? // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. № 12. P. 1450–1457. https://doi.org/10.1134/S0001433822120192

Remote Sensing Systems, 2023. URL: https://www.remss.com (date of access: 10.12.2023).

Shapiro S.S. and Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // Biometrika, 1965. V. 52. P. 591–611

Schneider W., Donoso D., Garcés-Vargas J., Escribano R. Watercolumn cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High// Prog. in Oceanogr. 2017. V.151. P. 38–48 http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2016.11.004 0079-6611

Schwing F.B., Farrell M.O., Steger J.M., Baltz K. Coastal upwelling indices west coast of North America 1946–1995 // NOAA Tech. Rep. NMFS SWFSC 231. 1996. 144 p. NOAA, Seattle, Wash.

Schwing F.B., Mendelssohn R. Increased coastal upwelling in the California Current System. // J. of Geophys. Res.: Oceans. 1997. V. 102. Issue C2. P. 3421–3438. https://doi. org/10.1029/96JC03591

Strub P.T., James C., Montecino V., Rutllant J.A., Blanco J.L. Ocean circulation along the southern Chile transition region (38°–46° S): Mean, seasonal and interannual variability, with a focus on 2014–2016 // Prog. Oceanogr. 2019. 172. https://doi. org/10.1016/j.pocean.2019.01.004

Tim N., Zorita E., Hünicke B. Decadal variability and trends of the Benguela Upwelling System as simulated in a high oceanonly simulation // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 483–502. https:// doi.org/10.5194/os-11-483-2015

Varela R., Álvarez I., Santos F., et al. Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982-2010? // Sci. Rep. 2015. V. 5. 10016. https://doi.org/10.1038/srep10016

Low-Frequency Wind Field Variability in the Chilean Upwelling Region A. B. Polonsky¹, A. N. Serebrennikov¹

¹Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

This paper analyzes the impact of changes in surface wind (SW) speed and direction in the northern and southern parts of the Chilean upwelling (CA) on the interannual and interdecadal variability of the Ekman upwelling index. Satellite data were used for the period 1988 - 2022's. It is shown that the increase in wind speed in the northern part of the CA region during 1997-2004 was mainly accompanied by the change in the direction of SW in the coastal zone which favors the upwelling intensification. For other periods (with the exception of certain years) this pattern was not case. In general, wind speed changes in the northern part of the CA region impact a little bit more effectively the changes in the upwelling index than changes in the SW direction. In the southern CA part, the change in the Ekman upwelling index is mostly determined by the change in the SW speed. Longterm variability of wind speed in the upwelling zone is realized in the form of a multidecadal oscillation, the period of which is estimated at 65-70 years which coincides with the typical period of the Atlantic multidecadal oscillation.

Keywords: Ekman upwelling index, center of mass, speed and direction of the surface wind, interannual and interdecadal variability

REFERENCES

Abrahams A., Schlegel R.W., Smit A.J. Variation and Change of Upwelling Dynamics Detected in the World's Eastern Boundary Upwelling Systems // Front. Mar. Sci. 2021. V. 8. 626411. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.626411

Aguirre C., García-Loyola S., Testa G., Silva D., Farías L. Insight into anthropogenic forcing on coastal upwelling off south-central Chile // Elementa: Sci. Anthropocene. 2018. V. 6(1). 59. https://doi.org/10.1525/elementa.314

Aguirre C., Pizarro O., Strub P.T., Garreaud, R., Barth J.A. Seasonal dynamics of the near-surface alongshore flow off central Chile // J. Geophys. Res. Ocean. 2012. 117. https://doi.org/10.1029/2011JC007379

Ancapichún S., Garcés-Vargas J. Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile // Cienc. Mar. 2015. V. 41. P. 1–20.

Averyanova E.A., Polonsky A.B. Issledovanie izmenchivosti turbulentnykh potokov tepla s ispolzovaniem razlozheniya na empiricheskie ortogonalnye funktsii // Zaklyuchitelnyy otchet po NIR "Fundamentalnye issledovaniya protsessov v klmaticheskoy sisteme, opredelyayushchikh prostranstvenno-vremennuyu ismenchivost prirodnoy sredy globalnogo i regionalnogo masshtabov", registratsionnyy № NIOKTR 121122300074-7. 2023. P. 19–27.

Bakun A. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling // Science. 1990. V. 247. P. 198–201. https://doi.org/10.1126/science.247.4939.198

Bakun A., Black B.A., Bograd S.J., García-Reyes M., Miller A.J., Rykaczewski R.R., et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems // Curr. Clim. Change Rep. 2015. V. 1. P. 85–93. https://doi.org/10.1007/ s40641-015-0008-4

Bello M., Barbieri M., Salinas S., Soto L. Surgencia costera en la zona central de Chile, durante el ciclo El Niño-La Niña 1997–1999. In El Niño-La Niña 1997–2000. // Sus Efectos en Chile. CONA, Chile, Valparaíso. 2004. P. 77–94.

Bordbar M.H., Mohrholz V., Schmidt M. The Relation of Wind-Driven Coastal and Offshore Upwelling in the Benguela

Upwelling System // J. of phys. Oceanography, 2021. V. 51. P. 3117–3133. https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0297.1

Carr M.E., Kearns E.J. Production regimes in four Eastern Boundary Current systems // Deep Sea Res. 2003. Part II: Top. Stud. Oceanogr. V. 50. P. 3199–3221.

Center of mass, 2023. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ Center_of_mass (date of access: 10.12.2023).

Climate Data Store, 2023. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp (date of access: 10.12.2023).

Cropper T.E., Hanna E., Bigg G.R. Spatial and temporal seasonal trends in coastal upwelling off Northwest Africa, 1981–2012 // J. Deep-Sea Research. 2014. Part I. V. 86. P. 94–111. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.01.007

FAO. El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura 2016. Contribución a la Seguridad Alimentaria y la Nutrición Para Todos; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: Roma, Italia. 2016. 224 p.

Fuenzalida R., Schneider W., Garcés-Vargas J., Bravo L. Satellite altimetry data reveal jet-like dynamics of the Humboldt Current // J. Geophys. Res. Ocean. 2008. 113. https://doi.org/10.1029/2007JC004684

Garc'ia-Reyes M., Koval G., Sydeman W.J., Palacios D., Bedriñana-Romano L., DeForest K., Montenegro Silva C., Sepu' lveda M. and Hines E. Most eastern boundary upwelling regions represent thermal refugia in the age of climate change // Front. Mar. Sci. 2023. V. 10. 1158472. https://doi.org/10.3389/ fmars.2023.1158472

Muñoz R., Odette A. V., Pedro A. F., Piero M., Marcus S., Gonzalo S. S. On the phenology of coastal upwelling off central-southern Chile // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2023. V. 104. 101405. https://doi.org/10.1016/j.dynat-moce.2023.101405

Oyarzún D., Brierley C. The future of coastal upwelling in the Humboldt current from model projections // Climate Dynamics. 2019. V. 52. Issue 1–2. P. 599-615. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4158-7

Patti B., Guisande C., Vergara A., Riveiro I., Maneiro I., Barreiro A., Bonanno A., Buscaino G., Cuttitta A., Basilone G. Factors responsible for the differences in satellite-based chlorophyll a concentration between the major global upwelling areas // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2008. V. 76. P. 775–786. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.005

Pinochet A., José G.-V., Carlos L., Francisco O. Seasonal Variability of Upwelling off Central-Southern Chile // Remote Sens. 2019. V. 11. 1737. https://doi.org/10.3390/RS11151737

Polonsky A.B., Serebrennikov A.N. 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. https://doi.org/10.1134/ S0001433820090200

Polonsky A.B., Serebrennikov A.N. Influence of Different Satellite Data on Surface Winds on Coastal Upwelling. Part 2: Pacific Ocean // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. No. 12. P. 1670–1679. https://doi.org/10.1134/S0001433821120173

Polonsky A.B., Serebrennikov A.N. What is the Reason for the Multiyear Trends of Variability in the Benguela Upwelling? // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. № 12. P. 1450–1457. https://doi.org/10.1134/S0001433822120192

Polonsky A.*B., Voskresenskaya* E.*N.* O statisticheskoy strukture gidrometeorologicheskikh poley v Severnoy Atlantike // Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal. 2004. №1. P. 14–25

Remote Sensing Systems, 2023. URL: https://www.remss. com (date of access: 10.12.2023).

Shapiro S.S. and Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // Biometrika, 1965. V. 52. P. 591–611.

Schneider W., Donoso D., Garcés-Vargas J., Escribano R. Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High // Prog. in Oceanogr. 2017. V.151. P. 38–48 http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2016.11.004 0079-6611

Schwing F.B., Farrell M.O., Steger J.M., Baltz K. Coastal upwelling indices west coast of North America 1946–1995 // NOAA Tech. Rep. NMFS SWFSC 231. 1996. 144 p. NOAA, Seattle, Wash.

Schwing F.B., Mendelssohn R. Increased coastal upwelling in the California Current System. // J. of Geophys. Res.: Oceans. 1997. V. 102. Issue C2. P. 3421–3438. https://doi.org/10.1029/96JC03591

Strub P.T., James C., Montecino V., Rutllant J.A., Blanco J.L. Ocean circulation along the southern Chile transition region (38°–46° S): Mean, seasonal and interannual variability, with a focus on 2014–2016 // Prog. Oceanogr. 2019. 172. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.01.004

Tim N., Zorita E., Hünicke B. Decadal variability and trends of the Benguela Upwelling System as simulated in a high ocean-only simulation // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 483–502. https://doi.org/10.5194/os-11-483-2015

Varela R., Álvarez I., Santos F., et al. Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982-2010? // Sci. Rep. 2015. V. 5. 10016. https://doi.org/10.1038/srep10016

Vershovskiy M.G., Kondratovich K.V. Yuzhno-tikhookeanskiy subtropicheskiy antitsiklon: intensivnost i lokalizatsiya // Meteorologiya i gidrologiya. 2007. №12. P. 29–34.