

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

В ЧЕМ ПРИЧИНА МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ И МНОГОЛЕТНИХ ТЕНДЕНЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ БЕНГЕЛЬСКОГО АПВЕЛЛИНГА?

© 2022 г. А. Б. Полонский^а, *, А. Н. Серебренников^а

^аФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь, Россия

*E-mail: apolonsky5@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

В статье сравнивается влияние изменений модуля вектора и направления приповерхностного ветра (ПВ) в зоне Бенгельского апвеллинга на межгодовую и междекадную изменчивость экмановского индекса апвеллинга. Показано, что усиление скорости ветра, как правило, сопровождается таким изменением направления ПВ в прибрежной зоне, которое благоприятствует интенсификации апвеллинга. В целом, изменение модуля ветра в большей степени влияет на изменение индекса апвеллинга, чем изменение направления ПВ. Вместе с тем, в отдельные периоды роль изменения ориентации вектора ветра в апвеллинговой зоне возрастает и становится более важной, чем роль вариаций модуля вектора ветра. В частности, этот вывод справедлив для последних 5–6 лет.

Ключевые слова: экмановский индекс апвеллинга, центр масс, модуль скорости и направление приповерхностного ветра, межгодовая и междекадная изменчивость

DOI: 10.31857/S0205961422060094

ВВЕДЕНИЕ

Система восточных пограничных апвеллингов (Eastern Boundary Upwelling System, EBUS) представляет собой широко распространенное явление в Атлантическом и Тихом океанах. Знание межгодовой изменчивости и долгосрочных тенденций интенсивности EBUS и их причин чрезвычайно важно не только для сохранения морского биоразнообразия и развития рыболовства, но и для успешного решения климатических задач, причем, как регионального, так и глобального масштабов (IPCC, 2014; IPCC AR6 WGI, 2021). Бенгельский апвеллинг (рис. 1) является одним из основных и наиболее интенсивных представителей EBUS (Cushing, 1971; Carr, 2002; Chavez, Messié, 2009; Fréon et al., 2009; Upwelling, 2013; García-Reyes et al., 2015).

Начиная со статьи Бакуна (Bakun, 1990) было опубликовано несколько работ, доказывающих, что глобальное потепление должно сопровождаться усилением EBUS в результате усиления теплового контраста между сушей и океаном при потеплении климата. Однако после этого были опубликованы различные точки зрения на долгосрочные тенденции EBUS (в том числе, Бенгельского апвеллинга) (например, IPCC, 2014; Bakun et al., 2015; Tim et al., 2015; Varela et al., 2015; Polonsky, Serebrennikov, 2020; Abrahams et al., 2021; Bordbar et al., 2021). Основной причиной разногласий между разными авторами относительно долгопериодных трендов различных параметров

EBUS является отсутствие многолетних наблюдений за полем ветра в прибрежной зоне достаточной точности и наличие высокоамплитудной межгодовой-междекадной естественной изменчивости характеристик апвеллинга (Veitch et al., 2010; Tim et al., 2015; Polonsky, 2019).

Авторы настоящей статьи проанализировали многолетние тенденции Канарского и Бенгельского апвеллингов по спутниковым данным, обработанным различными научными группами (Полонский, Серебренников, 2021). Было показано, что, несмотря на существенные расхождения между различными оценками, все временные ряды показывают общую тенденцию усиления атлантической EBUS между 1980-ми и концом 1990-х гг. Основная доля общей интенсификации атлантических апвеллингов приходится на усиление экмановских дрейфовых течений и восходящее компенсирующее движение подповерхностных вод. Влияние вариаций экмановской накачки (вследствие изменения завихренности поля ветра) вторично. Это подтверждает опубликованные результаты об усилении Канарского и Бенгельского апвеллинга (БА) в условиях глобального потепления. Однако с начала 2000-х гг. устойчивая интенсификация этих апвеллингов прекратилась. Отмечаются высокоамплитудные межгодовые-междекадные изменения скорости подъема вод в области атлантической EBUS. Это доказывает важную роль естественных вариаций

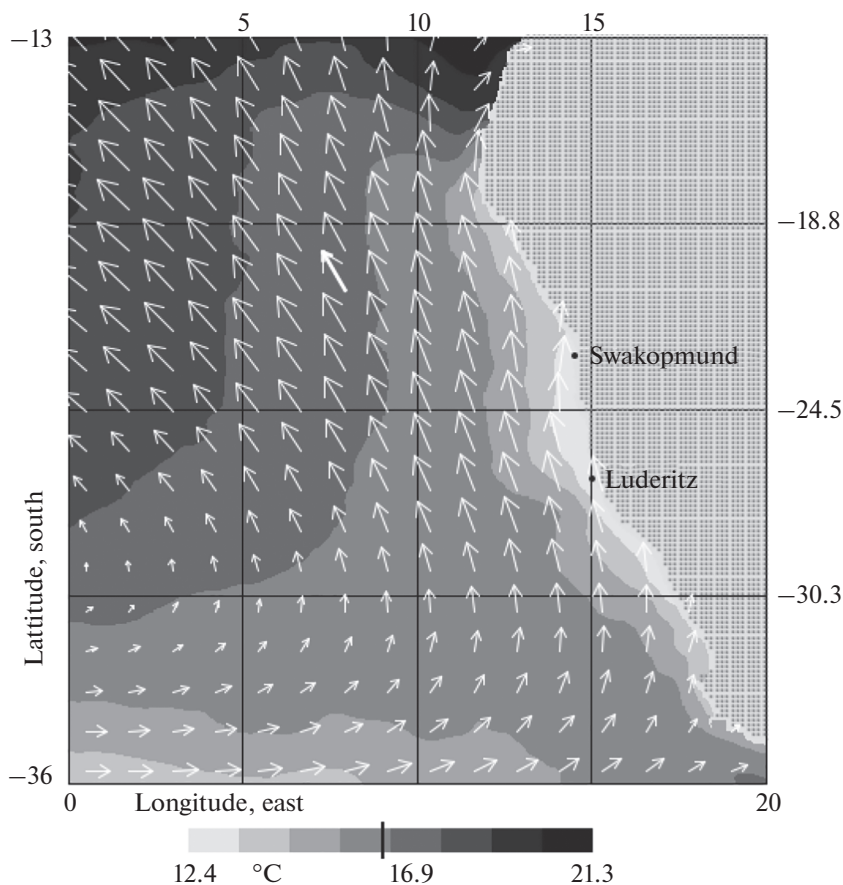


Рис. 1. Район Бенгельского апвеллинга. Приведена карта среднемесячных климатических величин температуры поверхности океана и векторы приповерхностного ветра для сентября. Для расчета использовались спутниковые данные за 1988–2021 гг.

в поле ветра в формировании изменчивости интенсивности апвеллингов.

Междекадные климатические вариации сопровождаются смещением субтропического максимума давления и сопутствующим изменением вдольбереговой компоненты ветра. Для БА это было продемонстрировано, в частности, в работе (Полонский, Серебренников, 2019). Таким образом, возникает вопрос: в какой степени изменение интенсивности сгонных ветров является следствием усиления ветра, а в какой — вызвана разворотом векторов ветра в прибрежной зоне из-за смещения субтропического максимума давления в Южной Атлантике? В настоящей статье этот вопрос обсуждается применительно к БА с использованием одного из последних массивов спутниковых данных о поле ветра с 1988 по 2021 гг., качество которого проанализировано в работе (Полонский, Серебренников, 2021).

Статья организована таким образом. Следующий раздел посвящен описанию используемых данных и метода их обработки. Затем приводятся и обсуждаются основные результаты. В послед-

нем разделе сформулированы некоторые заключительные замечания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

В работе использовались спутниковые данные о приповерхностном ветре (ПВ) CCMP OCW (Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind) за 27-летний период (с 1988 по 2014 гг.) версии v.2.0, REP (уточненные данные) и за 7-летний период (с 2015 по 2021 гг.) версии v.2.1, NRT (данные почти в реальном времени). Данные получены из архива PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), NASA (Remote Sensing Systems, 2022). Пространственное разрешение этих данных составляет $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (градусы широты и долготы). Временное разрешение 6 часов. Параметры осредненного суточного экмановского переноса рассчитывались для каждой точки прибрежной области Бенгельского апвеллинга. Ширина области выбиралась из условия близости к бароклинному радиусу деформации Россби для БА с учетом пространственного разре-

шения данных. В прибрежной зоне БА радиус деформации Росбси изменяется в диапазоне 30–40 км для широт $-35^\circ \dots -20^\circ$ и между 40 и 55 км для широт $-20^\circ \dots -15^\circ$ (Chelton et al., 1998). Поэтому ширина области для расчета параметров апвеллинга была выбрана 0.5° . Суточный экмановский перенос в прибрежной зоне рассчитывался как среднее значение на каждой широте с использованием среднесуточных значений в узлах координатной сетки. Сравнительное изучение различных спутниковых данных о ветре для оценки многолетних тенденций крупнейших атлантических апвеллингов (Канарского и Бенгельского) выполнено в работе (Полонский, Серебрянников, 2021). Оно показало, что выбранное здесь поле ветра хорошо описывает межгодовые-междекадные тенденции экмановского сгона в области БА и доступно с 1988 г.

Значения экмановского транспорта зависят от угла наклона береговой линии к кругу широты. Угол считается положительным, если он отложен от параллели в направлении против хода часовой стрелки и отрицательным – по ходу часовой стрелки. Ниже приведены аппроксимированные углы наклона береговой линии к кругу широты в районе Бенгельского апвеллинга для разных диапазонов широт: 120° для $34 - 27^\circ$ ю.ш., 98° для $27 - 23^\circ$ ю.ш., 120° для $23 - 17^\circ$ ю.ш., 90° для $17 - 16^\circ$ ю.ш., что в среднем составляет 113.4° . Направление ПВ для апвеллинговой области, как и экмановский перенос, рассчитывались в фиксированной маске шириной 0.5° , прилегающей к береговой линии.

Направление и скорость ПВ влияют на экмановский индекс прибрежного апвеллинга (EUI). Этот индекс вычисляется из экмановского транспорта (Q), который создается вдольбереговой составляющей касательного напряжения ветра τ на поверхности океана (Storper et al., 2014). Зональная (τ_x) и меридиональная (τ_y) компоненты напряжения ветра вычисляются из компонентов вектора ПВ с использованием соотношений, следующих из полуэмпирической теории турбулентности для приводного слоя атмосферы:

$$\begin{aligned} \tau_x &= \rho_a C_d (U^2 + V^2)^{1/2} U, \\ \tau_y &= \rho_a C_d (U^2 + V^2)^{1/2} V, \end{aligned} \quad (1)$$

где U и V зональная и меридиональная компоненты ветра на высоте 10 м соответственно; ρ_a – плотность воздуха в стандартных условиях (1.22 кг/м^3); C_d – безразмерный эмпирический коэффициент, типичное значение которого равно 1.3×10^{-3} (Schwing et al., 1996). Использована прямоугольная декартова система координат с положительными направлениями на восток (x) и на север (y). Затем рассчитываются зональная и меридиональная компоненты экмановского транспорта:

$$Q_x = \tau_y / (\rho_w f), \quad Q_y = -\tau_x / (\rho_w f),$$

где ρ_w – плотность морской воды; f – параметр Кориолиса, равный $2\Omega \sin(\theta)$. Здесь Ω – угловая скорость вращения Земли, θ – географическая широта места.

Экмановский индекс апвеллинга (экмановский перенос) рассчитывается по формуле:

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

где Q_x и Q_y – зональная и меридиональная компоненты экмановского транспорта; φ – угол наклона береговой линии к параллели. В принятой декартовой системе координат справедливо утверждение, что положительное значение EUI создает благоприятные условия для развития апвеллинга.

Согласно вышеприведенным формулам (1, 2) 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 ($W = (U^2 + V^2)^{1/2}$). Приповерхностный ветер также характеризуется направлением (A), который можно выразить через компоненты ветра как $A = \arctg(V/U)$. Таким образом изменчивость экмановского транспорта (переноса) зависит от изменчивости зональной (U) и меридиональной (V) компонент ПВ.

Для анализа связи изменений экмановского индекса (EUI) с модулем вектора ПВ (W) и его направлением (A) воспользуемся стандартной методикой вычисления центров масс (Center of mass, 2022). Если положения n материальных точек системы (m_i) задано при помощи их радиус-векторов (r_i), то радиус-вектор, определяющий положение центра масс (r_c) можно найти как:

$$r_c = \frac{\sum_{i=1}^n r_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$

Это выражение считается определением центра масс системы. При этом абсцисса (x_c) и ордината (y_c) центра масс равны соответственно:

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \\ y_c &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \end{aligned}$$

В нашем случае мы будем рассчитывать центр масс следующих пар взаимных распределений: W и EUI ; A и EUI , а также A и W . В первом из этих случаев считается, что абсцисса x_i – это модуль вектора ПВ, ордината y_i – индекс экмановского транспорта (апвеллинга), m_i – точка на плоскости с координатами (x_i , y_i) и, соответственно, центр

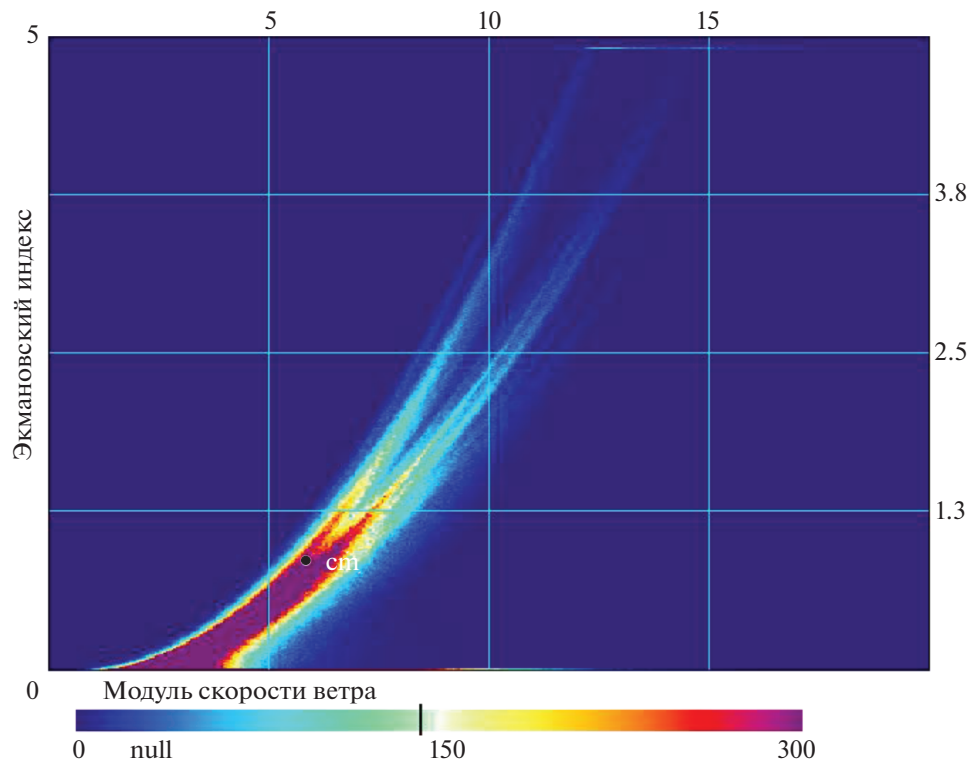


Рис. 2. Взаимное распределение экмановского индекса апвеллинга (EUI) с модулем скорости (W) за 1988–2021 гг. Шкала под рисунком показывает плотность распределения. Символом “●” показан центр масс взаимного распределения ($EUI = 0.78 \text{ м}^2/\text{с}$, $W = 5.73 \text{ м}/\text{с}$).

масс распределений будет расположен в точке (x_c, y_c) . Во втором случае абсцисса соответствует направлению вектора ветра и т.д. Распределения рассчитываются для всех точек области предполагаемого апвеллинга на основании анализа среднесуточных векторов ПВ за каждый год и в целом за весь период наблюдений с 1988 по 2021 гг. Сравнение временного хода полученных характеристик позволяет в явном виде проиллюстрировать влияние изменений модуля и направления вектора приводного ветра на вариации интенсивности экмановского апвеллинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2 показано взаимное распределение экмановского индекса апвеллинга с модулем вектора приповерхностного ветра за весь период исследования, построенное по ежедневным векторам. Центр масс этого распределения ($EUI = 0.78 \text{ м}^2/\text{с}$, $W = 5.73 \text{ м}/\text{с}$) указывает, что осредненная среднесуточная скорость ветра в области БА составляет около $5.7 \text{ м}/\text{с}$, а средняя (в верхнем 10-метровом слое) величина сгонных течений — около $8 \text{ см}/\text{с}$.

Однако координаты центров масс распределений EUI и W существенно изменяются во времени. На рис. 3 хорошо видны эти изменения (с точ-

ностью до года). Причем они сильно коррелированы. Коэффициент корреляции по Спирмену между ежегодными величинами EUI и W существенно превышает 0.8 . Отметим, что непараметрический метод ранговой корреляции Спирмена применен здесь, т.к. EUI и W распределены не по нормальному закону согласно тесту Шапиро–Уилка (Shapiro and Wilk, 1965). Из рисунка 3 следует, что интенсивность апвеллинга подвержена высокоамплитудной изменчивости межгодового масштаба, а линейный тренд является плохой аппроксимацией долгопериодных тенденций экмановского сгона. Быстрая интенсификация апвеллинга происходила во второй половине 1990-х гг., особенно начиная с 1997 г. вместе с переходной фазой одного из самых интенсивных Эль-Ниньо за последние 100 лет. Начиная с 2000 г., индекс апвеллинга, также как и модуль вектора ПВ, перестали быстро увеличиваться. Средняя тенденция изменения индекса апвеллинга в 2000–2021 гг. близка к нулю (точнее, она характеризуется небольшим и незначимым положительным значением), а тренд модуля вектора ПВ при этом характеризуется слабой отрицательной величиной.

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



Рис. 3. Межгодовые изменения координат центров масс взаимного распределения экмановского индекса апвеллинга (красная линия) и модуля скорости приповерхностного ветра за 1988–2021 гг., построенные по ежегодным данным.

ном распределении последних (рис. 4 и 5). Средние за весь период координаты центра масс ($EUI = 0.78 \text{ м}^2/\text{с}$, $A = 103.36^\circ$) указывают на типичную величину направления сгонного ветра ПВ (около 103°), который вызывает экмановское течение со средней скоростью в верхнем 10-метро-

вом слое около $8 \text{ см}/\text{с}$ (рис. 4). Изменения во времени (с точностью до года) центров масс этих распределений (рис. 5), указывает на тот факт, что интенсификация апвеллинга, которое особенно быстро начала развиваться во второй половине 1990-х гг., сопровождалось более или менее устойчивым ростом угла наклона вектора ПВ к

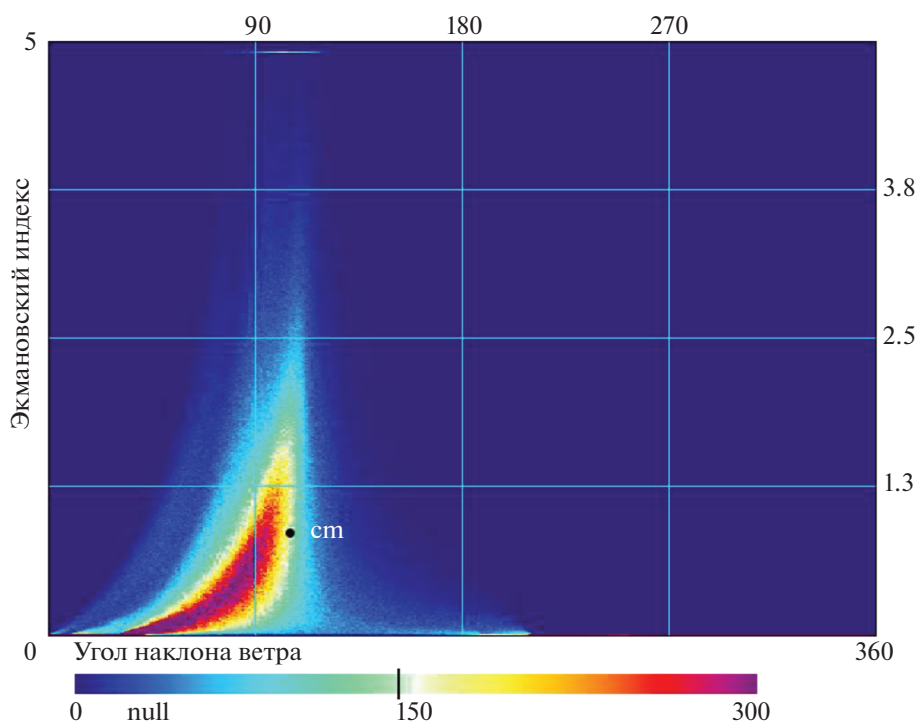


Рис. 4. Взаимное распределение EUI с направлением ПВ за 1988–2021 гг. Шкала под рисунком показывает плотность распределения. Символом “●” показан центр масс взаимного распределения ($EUI = 0.78 \text{ м}^2/\text{с}$, $A = 103.36^\circ$).



Рис. 5. Межгодовые изменения координат центров масс взаимного распределения *EUI* и направления ПВ (синяя линия) за 1988–2021 гг., построенные по ежегодным данным.

береговой черте, и к 2020 г. он приблизился к наиболее благоприятному для развития БА среднему углу (113.4°). Таким образом, *EUI* вырос в конце 1990-х годах как за счет увеличения *W*, так и за

счет изменения направления ветра в благоприятную (для развития апвеллинга) сторону. Между временной изменчивостью *EUI* и *A* наблюдается корреляция по Спирмену, приблизительно рав-

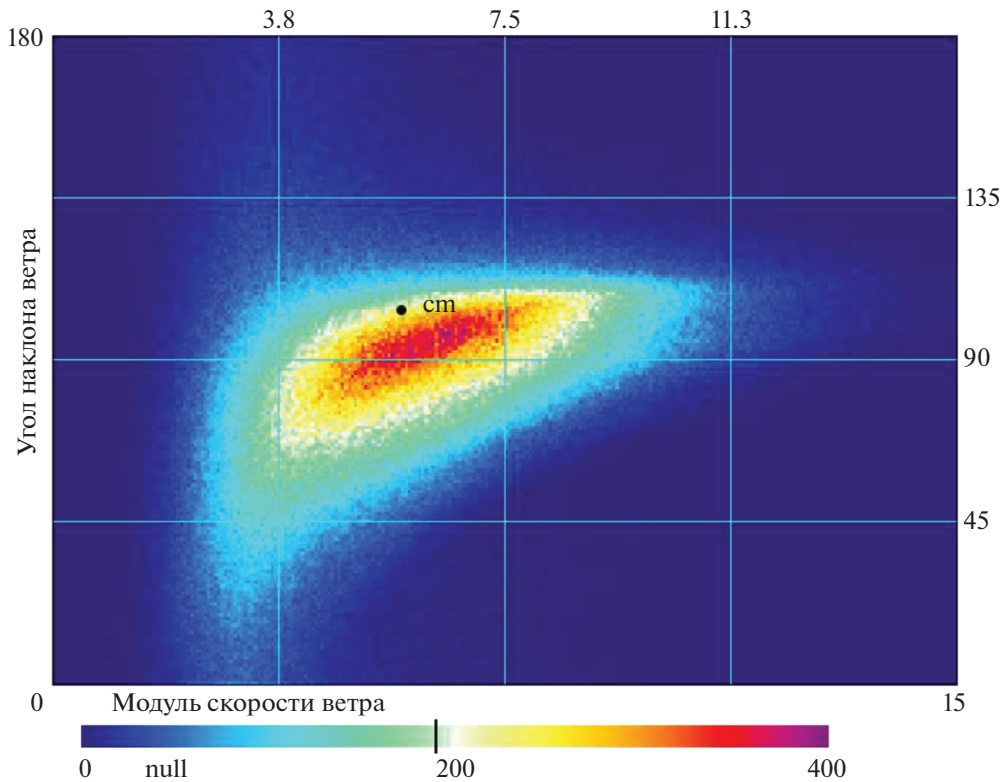


Рис. 6. Взаимное распределение направления (*A*) и модуля вектора ПВ (*W*) за 1988–2021 гг., рассчитанное по ежедневным значениям. Символом “●” показан центр масс ($A = 103.36^\circ$, $W = 5.73$ м/с). Распределение и центр масс рассчитывались в прибрежной апвеллинговой зоне шириной 0.5° .



Рис. 7. Межгодовые изменения координат центров масс взаимного распределения направления и модуля вектора при-поверхностного ветра (синяя линия) за 1988–2021 гг., построенные по ежегодным данным.

ная 0.64. Это меньше, чем корреляция между вариациями EUI и W . Однако для изменений величины EUI в некоторые периоды более важны направления ПВ, чем его скорость (W). Так, например, некоторый рост величины EUI в последние несколько лет, сопровождавшийся отмеченным выше фактом о небольшом ослаблении скорости ветра, в значительной степени объясняется изменением направления вектора ПВ в оптимальную для развития апвеллинга сторону.

Конечно, вариации W и A не являются статистически независимыми. На рис. 6 показано положение центра масс этих величин ($A = 103.36^\circ$, $W = 5.73$ м/с). Из этого рисунка следует, что средний для области БА угол наклона ветра к береговой черте составил в 1988–2021 гг. около 103° , а скорость ПВ – около 5.7 м/с. Причем, вариации этих параметров коррелированы между собой (рис. 7). Коэффициент корреляция по Спирмену между A и W составляет примерно 0.49. Вместе с тем, хорошо видно существенное различие между относительно низкочастотными вариациями этих параметров. Во второй половине 1990-х гг. скорость ветра в области БА быстро росла без аналогичного быстрого изменения A , а в последние годы, напротив, быстро рос A . Именно эти две тенденции в значительной степени определили характер временных изменений экмановского сгона в области БА, отмеченные во второй половине 1990-х гг. и в последние 5–6 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные оценки показывают, что в целом изменение модуля ветра в большей степени влияет на изменение индекса апвеллинга (и теснее коррелированы с ним), чем изменение направления ПВ. Вместе с тем, в отдельные периоды роль изменения направления вектора ветра в апвеллинговой зоне возрастает и становится не менее, а даже более важной, чем роль вариаций модуля вектора ветра. В частности, этот вывод справедлив для последних 5–6 лет.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы госзадания Института природно-технических систем “Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов”, госрегистрация № 121122300074-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Об изменении температуры поверхности океана в зоне Бенгельского апвеллинга. Часть 2: Многолетние тенденции // Исслед. Земли из космоса, 2019. № 4. С. 29–39. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019429-39>
- Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Долгопериодные тенденции интенсивности восточных пограничных апвеллинговых систем по различным спутниковым данным. Часть 1: Атлантические апвеллинги // Исслед. Земли из космоса, 2021. № 5. С. 31–45. <https://doi.org/10.31857/S0205961421050079>

- 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. 8: 626411.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.626411>
- 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>
- 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.* Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing // *Deep-Sea Res., Part II*, 2002. V. 49. № 1–3. P. 59–80.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00094-7)
- Center of mass*, 2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Center_of_mass (date of access: 20.06.2022).
- Chavez F.P., Messie M.* A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems // *Prog. Oceanogr.* 2009. V. 83. № 1–4. P. 80–96.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
- Chelton D.B., deSzoeke R.A., Schlax M.G., Naggar K.El, Siwertz N.* Geographical Variability of the First Baroclinic Rossby Radius of Deformation. // *J. Phys. Oceanogr.*, 1998. V. 28. P. 433–460.
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<0433:GVOT-FB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<0433:GVOT-FB>2.0.CO;2)
- 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>
- Cushing D.H.* Upwelling and the production of fish // *Adv. Mar. Biol.* 1971. V. 9. P. 255–334.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60344-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60344-2)
- Fréon P., Barange M., Aristegui J.* Eastern boundary upwelling ecosystems: integrative and comparative approaches // *Prog. Oceanogr.* 2009. V. 83. P. 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.08.001>
- García-Reyes M., Sydeman W.J., Schoeman D.S., Rykaczewski R.R., Black B.A., Smit A.J. and Bograd S.J.* Under Pressure: Climate Change, Upwelling, and Eastern Boundary Upwelling Ecosystems // *Front. Mar. Sci.* 2015. V. 2. P. 109.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00109>
- IPCC*, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
- IPCC*, 2021. Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.
- Polonsky A.B.* The Ocean's Role in Climate Changes. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne, UK. 2019. 276 p.
- 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. № 9. P. 970–978.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820090200>
- Remote Sensing Systems*, 2022. URL: <https://www.remss.com> (date of access: 20.06.2022).
- Shapiro S.S. and Wilk M.B.* An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*, 1965. V. 52. P. 591–611.
- Schwing F.B., Farrell M.O., Steger J.M.* Coastal upwelling indices west coast of North America 1946–1995 // NOAA Tech. Rep. NMFS SWFSC 231. 1996. 144 p. NOAA, Seattle, Wash.
- Tim N., Zorita E., Hünnicke 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>
- Upwelling: Mechanisms, ecological effects and threats to biodiversity* (Eds. Fischer W.E., Green A.B.) // Nova Sci. Publ. Inc. USA. N.Y. 2013. P. 59–76.
- 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>
- Veitch J., Penven P. and Shillington F.* Modeling Equilibrium Dynamics of Benguela Current System. // *J. Phys. Oceanogr.* 2010. V. 40. P. 1942–1964.
<https://doi.org/10.1175/2010JPO4382.1>

What is the Reason for the Multi-Year Trends of Variability Benguela Upwelling?

A. B. Polonsky¹ and A. N. Serebrennikov¹

¹*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia*

The article compares the effect of changes in the vector modulus and direction of near-surface wind (NSW) in the Benguela upwelling zone on the interannual-to-interdecadal variability of the Ekman upwelling index. It is shown that an increase in wind speed, as a rule, is accompanied by such a change in the direction of NSW in the coastal zone, which favors the upwelling intensification. In general, the change in the wind module affects the change in the upwelling index to a greater extent than the change in the NSW direction. At the same time, in some periods, the role of the change in the wind vector direction in the upwelling zone increases and

becomes no less important than the role of variations in the wind vector modulus. In particular, this conclusion is valid for the last 5–6 years.

Keywords: Ekman upwelling index, center of mass, surface wind velocity modulus and direction, 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. 8: 626411.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.626411>
- 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>
- Bordbar M.H., Mohrholz V., Schmidt M.* The Relation of Wind-Driven Coastal and Offshore Upwelling in the Benguela Upwelling System // *J. phys. Oceanography*, 2021. V. 51. P. 3117–3133.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0297.1>
- Carr M.E.* Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing. // *Deep-Sea Res.*, Part II, 2002. V. 49. № 1–3. P. 59–80.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00094-7)
- Center of mass.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Center_of_mass. 2022 (date of access: 20.06.2022).
- Chavez F.P., Messie M.* A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems // *Prog. Oceanogr.* 2009. V. 83. № 1–4. P. 80–96.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
- Chelton D.B., deSzoeke R.A., Schlax M.G., Naggar K.El, Szwertz N.* Geographical Variability of the First Baroclinic Rossby Radius of Deformation. // *J. Phys. Oceanogr.*, 1998. V. 28. P. 433–460.
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<0433:GVOTFB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<0433:GVOTFB>2.0.CO;2)
- 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>
- Cushing D.H.* Upwelling and the production of fish // *Adv. Mar. Biol.* 1971. V. 9. P. 255–334.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60344-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60344-2)
- Fréon P., Barange M., Aristegui J.* Eastern boundary upwelling ecosystems: integrative and comparative approaches // *Prog. Oceanogr.* 2009. V. 83. P. 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.08.001>
- García-Reyes M., Sydeman W.J., Schoeman D.S., Rykaczewski R.R., Black B.A., Smit A.J., Bograd S.J.* Under Pressure: Climate Change, Upwelling, and Eastern Boundary Upwelling Ecosystems // *Front. Mar. Sci.* 2015. V. 2. P. 109.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00109>
- IPCC*, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
- IPCC*, 2021. Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SP-M_final.pdf.
- Polonsky A.B.* The Ocean's Role in Climate Changes. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne, UK, 2019. 276 p.
- Polonsky A.B., Serebrennikov A.N.* Ob izmenenii temperatury poverhnosti okeana v zone Bengel'skogo apvellinga. CHast' 2: mnogoletnie tendentsii [On the Change in the Sea Surface Temperature in the Benguela Upwelling Region: Part II. Long-Term Tendencies] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2019. № 4. P. 29–39. (In Russian).
<https://doi.org/DOI:10.31857/S0205-96142019429-39>
- 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. № 9. P. 970–978.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820090200>
- Polonsky A.B., Serebrennikov A.N.* Dolgoperiodnye tendentsii intensivnosti vostochnykh pogranychnykh apvelingovykh sistem po razlichnym sputnikovym dannym. Ch.1: Atlanticheskie apvellingi [Long-term tendencies of intensity of eastern coastal upwelling systems assessed using different satellite data on surface winds. Part 1: Atlantic Ocean] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2021. № 5. C. 31–45. (In Russian).
- Remote Sensing Systems*, 2022. URL: <https://www.remss.com> (date of access: 20.06.2022).
- Shapiro S.S., Wilk M.B.* An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*, 1965. V. 52. P. 591–611.
- Schwing F.B., Farrell M.O., Steger J.M.* Coastal upwelling indices west coast of North America 1946–1995 // NOAA Tech. Rep. NMFS SWFSC 231. 1996. 144 p. NOAA, Seattle, Wash.
- 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>
- Upwelling: Mechanisms, ecological effects and threats to biodiversity* (Eds. Fischer W.E., Green A.B.) // Nova Sci. Publ. Inc. USA. N.Y. 2013. P. 59–76.
- 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>
- Veitch J., Penven P. and Shillington F.* Modeling Equilibrium Dynamics of Benguela Current System. // *J. Phys. Oceanogr.* 2010. V. 40. P. 1942–1964.
<https://doi.org/10.1175/2010JPO4382.1>