

## Методика пространственного разделения апвеллинга по характеру сезонной изменчивости

А. Н. Серебренников

*Институт природно-технических систем РАН, Севастополь, 299011, Россия*

*E-mail: swsilv@gmail.com*

В статье рассмотрена методика разделения прибрежного апвеллинга на части, различающиеся сезонным ходом. Среднемесячные значения термического индекса апвеллинга, вертикальной скорости экмановского транспорта и экмановской накачки были рассчитаны на основе ежедневной спутниковой информации о температуре поверхности моря и приповерхностном ветре. Суммирование каждой из этих величин по широтам предполагаемого апвеллинга в климатических масках позволило определить широты, где сезонный ход апвеллинга должен меняться. Методика рассмотрена на примерах Бенгельского, Канарского, Перуанского и Чилийского апвеллингов. Для данных апвеллингов приводится рассчитанная по методике широта, предположительно делящая апвеллинг по характеру сезонной изменчивости. В качестве примера для южной и северной частей Бенгельского апвеллинга были построены графики сезонных изменений среднемесячных климатических значений вертикальной скорости экмановских параметров при различных широтах, делящих апвеллинг. Выбранная по методике широта близка к широте, которую предлагают использовать некоторые авторы (Tim et al., 2015) в качестве границы между южной и северной Бенгельскими апвеллинговыми системами.

**Ключевые слова:** сезонная изменчивость, прибрежный апвеллинг, термический индекс апвеллинга, экмановский транспорт, экмановская накачка, климатическая маска

Одобрена к печати: 20.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-9-17

### Введение

Апвеллинги Мирового океана создают вертикальный перенос водных масс из глубинных слоёв к поверхностным. С одной стороны, они обеспечивают перемешивание глубоководных вод с поверхностными в стратифицированном, в большей части, океане, что важно с климатической точки зрения. С другой стороны, апвеллинг переносит богатые питательными веществами водные массы в верхний фотический слой воды. В результате этого в районах апвеллинга формируются зоны повышенного первичного продуцирования вод и интенсивного развития планктонных сообществ, что значимо для рыболовства.

Обычно апвеллинги разделяют на два типа: возникающие в открытом океане и в прибрежной зоне. В данной работе рассматриваются прибрежные апвеллинги, встречающиеся в основном в субтропических районах пассатов. Прибрежные апвеллинги формируются при наличии благоприятной вдольбереговой компоненты ветра. Условием их возникновения в Северном полушарии является направление компоненты ветра с севера на юг при расположении берега слева и наоборот — в Южном полушарии. На прибрежные апвеллинги воздействуют устойчивые восточные ветры, называемые пассатами. В Северном полушарии направление пассатов преимущественно северо-восточное, в Южном — юго-восточное. Пассаты вызывают восходящее движение водных масс из более глубоких слоёв в поверхностные путём переноса воды, направленной перпендикулярно береговой линии. В этих субтропических регионах направление прибрежного ветра, связанное с системами высокого давления, приблизительно параллельно меридиональной ориентации береговой линии и, следовательно, интенсивность субтропических максимумов, как и расстояние от центра атмосферного давления до берега, влияет на интенсивность прибрежных апвеллингов (Tim et al., 2015). Таким образом, сезонные изменения ветра в прибрежной зоне модулируют сезонную изменчивость апвеллинга. Поле ветра порождает два физических механизма, которые могут способствовать

появлению апвеллинга: экмановский транспорт, возникающий из-за прибрежного напряжения ветра, и экмановская накачка, порождаемая циклоническим скручиванием ветра. Зная эти характеристики и термический индекс апвеллинга (thermal upwelling index, TUI), можно обоснованно разделить апвеллинг на части, различающиеся характером сезонного хода.

Как правило, прибрежные апвеллинги вытянуты вдоль берега, и их сезонный ход меняется в соответствии с географической широтой. В некоторых широтах наблюдается более существенное изменение сезонного хода, эти широты условно принимаются за точки, где апвеллинг разделяется на регионы. Деление апвеллинга на регионы не всегда очевидно и обосновано. Например, Бенгельский апвеллинг многие авторы делят на регионы по-разному. Некоторые ученые полагают, что интенсивность апвеллинга носит явно выраженный сезонный характер, по-разному проявляющийся в субтропических широтах ( $30\text{--}34^\circ$  ю. ш.) и в районах, расположенных ближе к экватору ( $15\text{--}30^\circ$  ю. ш.) (Chaigneau et al., 2009). Другие предлагают использовать  $28^\circ$  ю. ш. как границу между северной и южной Бенгельскими апвеллинговыми системами (Tim et al., 2015). В районе  $28^\circ$  ю. ш. находится сильный круглогодичный апвеллинг (Shannon, Nelson, 1996). Аналогичную картину можно наблюдать с Канарским апвеллингом. П. Чернышков в своей работе (Чернышков, 2006) разделяет Канарский апвеллинг по характеру внутригодовой изменчивости на три зоны: зону сезонного апвеллинга (между  $10$  и  $20^\circ$  с. ш.), зону интенсивного круглогодичного апвеллинга (между  $20$  и  $26^\circ$  с. ш.) и зону умеренного круглогодичного апвеллинга с выраженной сезонностью (между  $26$  и  $32^\circ$  с. ш.). Другие авторы разбивают области Канарского апвеллинга на три квазиоднородных района: северный ( $25\text{--}27^\circ$  с. ш.), центральный ( $21\text{--}23^\circ$  с. ш.) и южный ( $15\text{--}19^\circ$  с. ш.) (Малинин и др., 2002). Ряд исследователей полагает, что зона апвеллинга в Чили может быть разделена на два основных региона: северную область ( $18\text{--}30^\circ$  ю. ш.) и центральную/южную ( $30\text{--}42^\circ$  ю. ш.), данное предположение обосновано крупномасштабными океанографическими моделями (Escribano et al., 2004).

В настоящей работе методика разделения апвеллингов будет рассмотрена на примерах Бенгельского ( $13\text{--}36^\circ$  ю. ш.,  $0\text{--}20^\circ$  в. д.), Канарского ( $10\text{--}36^\circ$  с. ш.,  $5\text{--}30^\circ$  з. д.), Перуанского ( $0\text{--}18^\circ$  ю. ш.,  $70\text{--}90^\circ$  з. д.) и Чилийского ( $18\text{--}42^\circ$  ю. ш.,  $70\text{--}90^\circ$  з. д.) апвеллингов. Были проанализированы ежедневные карты температуры поверхности моря (sea surface temperature, SST) с пространственным разрешением  $0,05^\circ$  по широте и долготе за 33-летний период (с 1985 по 2017 г.), опубликованные на сайте CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service), и ежедневные векторные карты приповерхностного ветра за 30-летний период (с 1988 по 2017 г.), размещённые на сайте NCEP (National Centers for Environmental Prediction).

## Методика разделения апвеллинга

Для разделения апвеллинга по характеру сезонных изменений вычислялись среднемесячные значения TUI, вертикальные скорости экмановского транспорта ( $W_{EUI}$ ) и экмановской накачки ( $W_{EP}$ ). Эти параметры рассчитывались в ежемесячных климатических масках. В данной работе в качестве одной из характеристик апвеллингов использован TUI, рассчитываемый по разнице SST в зоне апвеллинга и в удалённой зоне, расположенной за его пределами. Фактически карты термического индекса служат для построения ежемесячных климатических масок, внутри которых в дальнейшем рассчитываются параметры апвеллинга. Найти область, занимаемую апвеллинговыми водами в определённый климатический месяц, и разделить маску можно методом, основанным на следующем предположении: SST в зоне апвеллинга должна быть ниже температуры в удалённой зоне на некоторую величину TL. TL — это температурный параметр, ограничивающий апвеллинговую область, и его можно представить как некую постоянную величину ( $TL_{const}$ ), умноженную на коэффициент, зависящий от текущего месяца и широты.  $TL_{const}$  — это температурный перепад между апвеллинговыми и оффшорными водами в реперный месяц на реперной широте, определяемый с учётом положения фронтальной зоны в поле SST. Более подробное описание методики определения TL и расчёта климатических масок можно найти в работе (Серебренников, 2018). Величина  $W_{EUI}$  рас-

считывается дифференцированием экмановского индекса апвеллинга (Ekman upwelling index, EUI) от берега поперёк апвеллиновой зоны до её внешней границы, определяемой масштабом Россби. Бароклинный радиус деформации Россби рассчитывается из фазовой скорости гравитационных волн и параметра Кориолиса (Chelton et al., 1998). EUI вычисляется из экмановского транспорта ( $Q$ ), который создаётся касательным напряжением трения ветра (Gómez-Gesteira et al., 2006) по формуле:

$$EUI = -Q_x \sin(\varphi) + Q_y \cos(\varphi), \quad (1)$$

где  $Q_x$  и  $Q_y$  — зональная и меридиональная компоненты экмановского транспорта;  $\varphi$  — угол наклона береговой линии к горизонтали. Скорость  $W_{EP}$  можно вычислить из компонентов касательного напряжения ветра по следующей формуле (Stommel et al., 1958):

$$W_{EP} = \frac{\text{rot } \tau}{\rho_w f} + \frac{\beta \tau_x}{\rho_w f^2},$$

где  $\tau$  и  $\tau_x$  — касательное напряжение приводного ветра и его зональная компонента соответственно;  $\rho_w$  — плотность морской воды;  $f$  — параметр Кориолиса;  $\beta = \partial f / \partial y$  (меридиональный градиент параметра Кориолиса). Раскроем ротор ( $\text{rot}$ ) и заменим компоненты напряжения ветра на компоненты экмановского транспорта:

$$W_{EP} = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - \frac{\beta Q_y}{f}.$$

С учётом того, что  $\beta = \partial f / \partial y = (2\Omega \cdot \cos(\theta)) / R_a$ , получаем:

$$W_{EP} = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - \frac{Q_y}{R_a \cdot \text{tg}(\theta)},$$

где  $\Omega$  — угловая скорость вращения Земли;  $\theta$  — географическая широта места;  $R_a$  — радиус Земли.

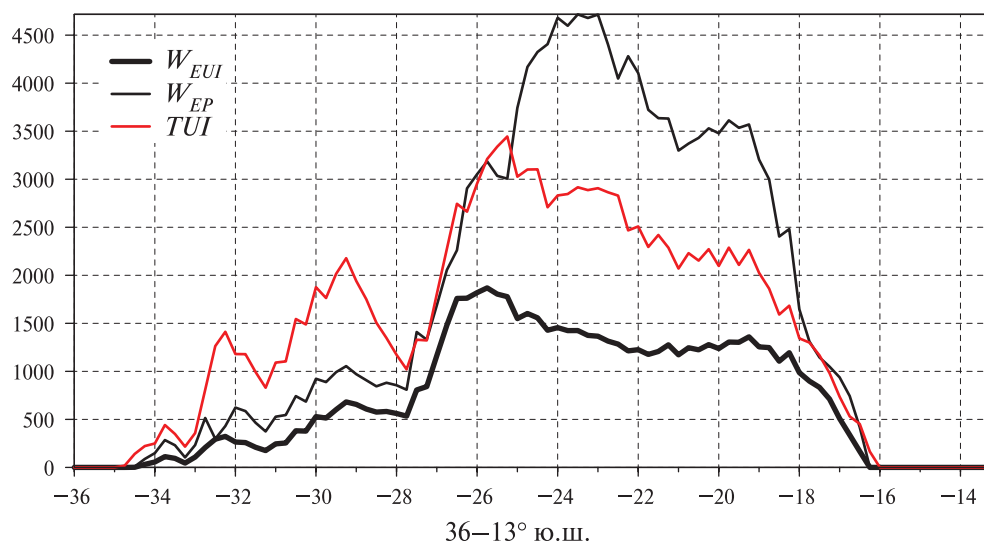
Для каждой широты в зоне предполагаемого апвеллинга просуммируем среднемесячные параметры  $TUI$ ,  $W_{EUI}$ ,  $W_{EP}$  по всем долготам, попавшим в климатические маски, и разделим на число месяцев в году (среднее арифметическое). Параметры суммировались за весь исследуемый период, а не только за те месяцы, где наблюдался апвеллинг по термическому индексу или по скоростям подъёма воды.

При анализе графиков на *рис. 1–4* необходимо учитывать, что  $W_{EUI}$  и  $W_{EP}$  являются основными задающими параметрами для апвеллинга, а  $TUI$  — это видимое проявление апвеллинга. Выделение апвеллинга по  $TUI$  не всегда оправданно, поскольку  $SST$  в окрестности крупномасштабных апвеллингов определяется не только вертикальной адвекцией, но и горизонтальными адвективными переносами, а также интенсивностью процессов перемешивания вод (Upwelling..., 2013). В некоторых случаях сезонный термоклин может блокировать выход холодных вод на поверхность. Ещё надо учитывать, что  $W_{EUI}$  играет большую роль в формировании апвеллинга, чем  $W_{EP}$ .

На графике *рис. 1* (см. с. 12) представлены результаты, полученные для Бенгельского апвеллинга. Видно, что в диапазоне широт  $26–27,8^\circ$  происходит резкий рост инверсного значения  $TUI$  и значений вертикальных скоростей подъёма воды  $W_{EUI}$  и  $W_{EP}$ . Учитывая, что  $W_{EUI}$  имеет больший вес по сравнению с  $W_{EP}$  и достигает максимума на широте  $27^\circ$ , эту широту можно считать границей раздела между южной и северной системами Бенгельского апвеллинга. Широта  $27,8^\circ$  является началом резкого роста параметров и тоже подходит для границы. Указанная во введении как точка деления апвеллинга широта  $28^\circ$  согласуется с данной методикой.

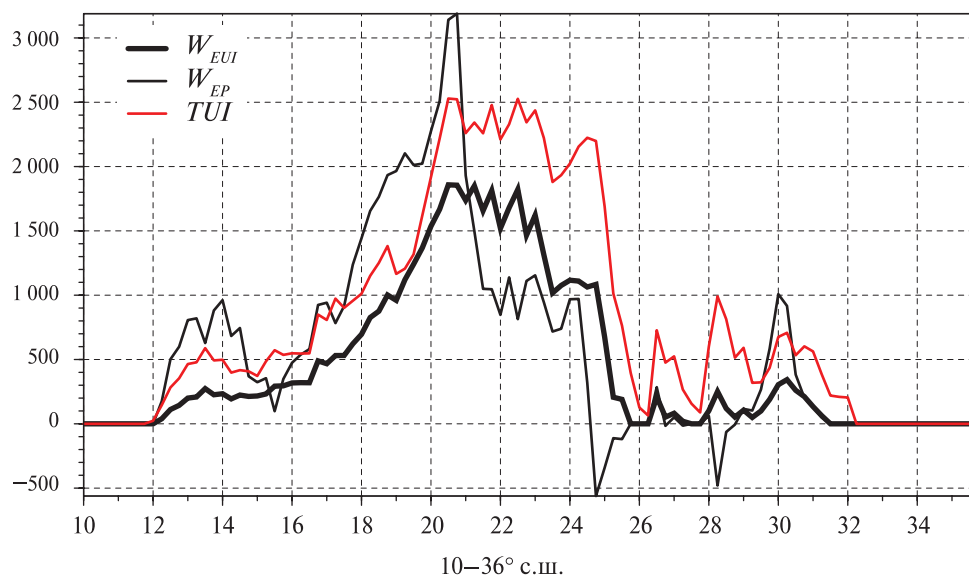
На *рис. 2* (см. с. 12) показан результат, полученный для Канарского апвеллинга. Видно, что характер графиков  $W_{EUI}$  и  $W_{EP}$  сильно изменился на широте  $21^\circ$ . На этой же широте  $TUI$  достиг своего максимального значения. Эту широту с большой вероятностью можно принять за границу между северной и южной частями Канарского апвеллинга. Указанное во введении

деление апвеллинга на три части (10–20° с. ш., 20–26° с. ш. и 26–32° с. ш.) не противоречит графикам на *рис. 2*.



*Рис. 1.* Бенгельский апвеллинг. Широтное распределение  $W_{EUI}$  ( $\times 10^{-7}$ , м/с, жирная чёрная линия),  $W_{EP}$  ( $\times 2 \cdot 10^{-6}$ , м/с, тонкая чёрная линия) и инверсное значение  $TUI$  ( $\times (-90)$ , °С, красная линия), осреднённых по всему временному интервалу. Для каждой широты значения параметров просуммированы по всем долготам внутри климатических масок

На *рис. 3* (см. с. 13) показан результат, полученный для Перуанского апвеллинга. Для него характерно сильное влияние скорости экмановской накачки. Максимальное значение  $W_{EP}$  всего лишь в два раза меньше максимального значения  $W_{EUI}$ . Для сравнения, максимальные скорости подъёма воды у Бенгельского апвеллинга отличаются примерно в 8 раз, а у Канарского — в 20 раз. В Перуанском апвеллинге нет резких изменений параметров, тем не менее его можно разделить на две части в точке 11° ю. ш. На этой широте начинается усиление всех трёх параметров, особенно  $TUI$  и  $W_{EP}$ .



*Рис. 2.* Канарский апвеллинг. Широтное распределение  $W_{EUI}$  ( $\times 10^{-7}$ , м/с, жирная чёрная линия),  $W_{EP}$  ( $\times 2 \cdot 10^{-6}$ , м/с, тонкая чёрная линия) и инверсное значение  $TUI$  ( $\times (-100)$ , °С, красная линия), осреднённых по всему временному интервалу. Для каждой широты значения параметров просуммированы по всем долготам внутри климатических масок

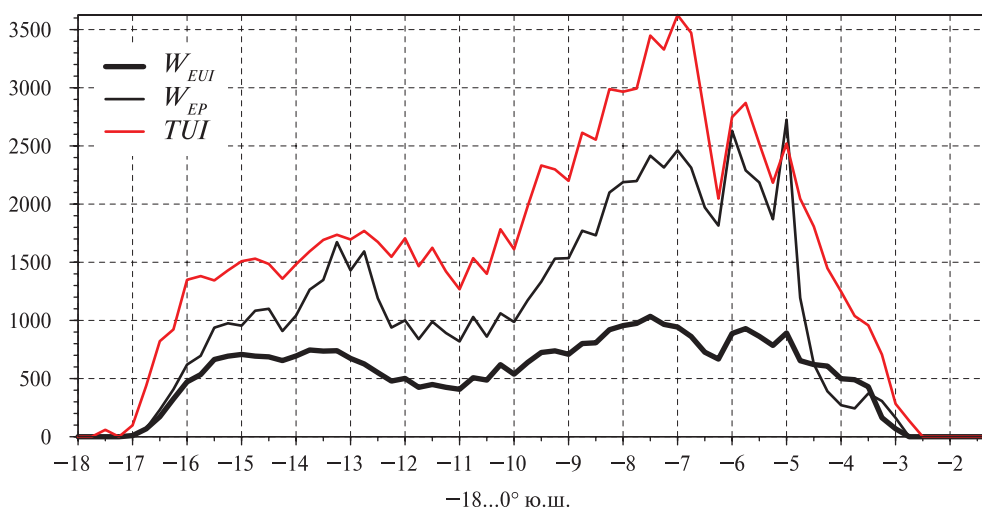


Рис. 3. Перуанский апвеллинг. Широтное распределение  $W_{EUI}$  ( $\times 10^{-7}$ , м/с, жирная чёрная линия),  $W_{EP}$  ( $\times 5 \cdot 10^{-7}$ , м/с, тонкая чёрная линия) и инверсное значение  $TUI$  ( $\times (-100)$ , °С, красная линия), осреднённых по всему временному интервалу. Для каждой широты значения параметров просуммированы по всем долготам внутри климатических масок

На рис. 4 показан результат, полученный для Чилийского апвеллинга. Видно, что  $W_{EUI}$  и  $W_{EP}$  изменили характер на  $36^\circ$  ю.ш.: рост инверсного  $TUI$  и скорости  $W_{EUI}$  достигли максимального значения. Эту широту с большой вероятностью можно принять за границу между северной и южной частями Чилийского апвеллинга. Второй явной границей деления апвеллинга является точка  $30^\circ$  ю.ш.: все три параметра, достигнув максимального значения, начинают спад. Это деление совпадает с мнением авторов работы (Escribano et al., 2004), приведённом во введении.

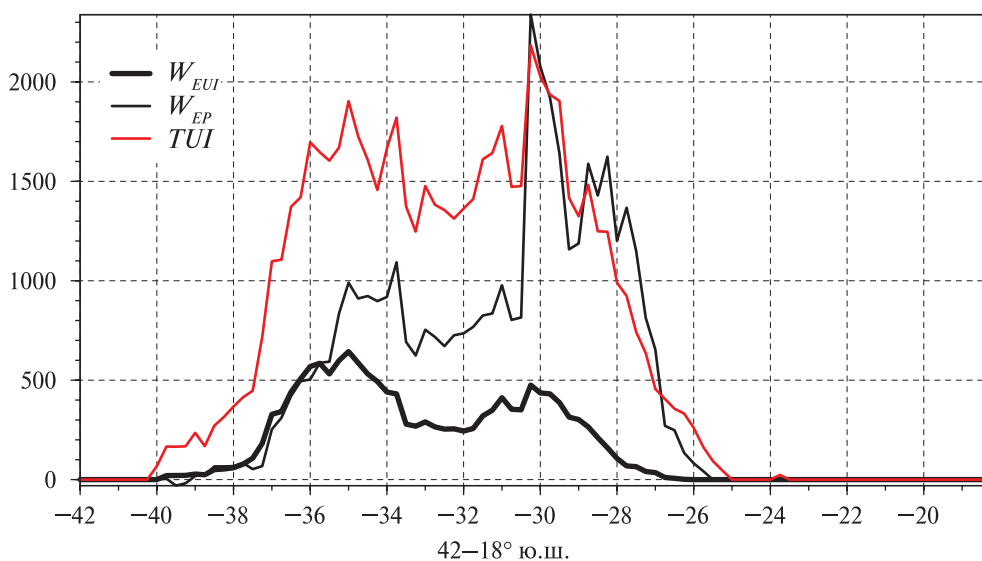


Рис. 4. Чилийский апвеллинг. Широтное распределение  $W_{EUI}$  ( $\times 10^{-7}$ , м/с, жирная чёрная линия),  $W_{EP}$  ( $\times 2 \cdot 10^{-6}$ , м/с, тонкая чёрная линия) и инверсное значение  $TUI$  ( $\times (-100)$ , °С, красная линия), осреднённых по всему временному интервалу. Для каждой широты значения параметров просуммированы по всем долготам внутри климатических масок

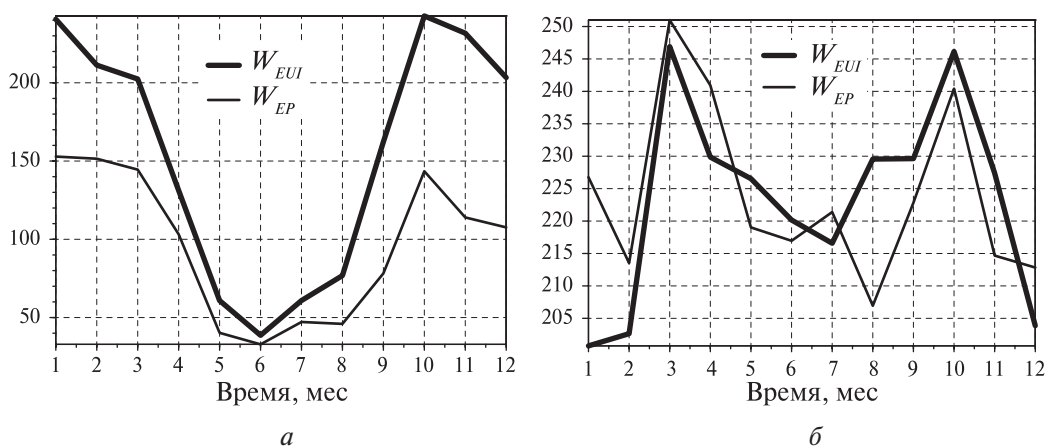
Из приведённых выше графиков видно, что некоторые апвеллинги можно делить на большее число частей. Поведение характеристики  $TUI$  (фактически это реакция на ветровое воздействие) подтверждает правильность деления.



### Результаты

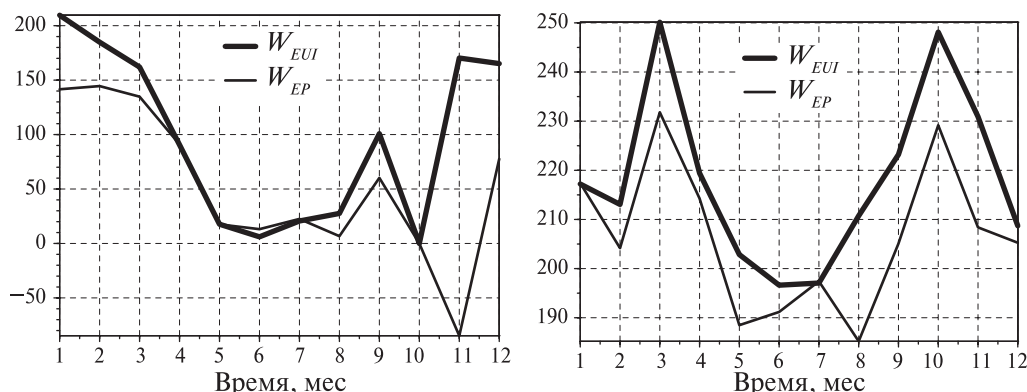
Ниже показан ход сезонных изменений среднемесячных климатических значений  $W_{EUI}$  и  $W_{EP}$  для южной и северной частей Бенгельского апвеллинга при различных широтах, делящих апвеллинг.

На *рис. 5* выбрана рекомендованная точка раздела —  $27^\circ$  ю. ш. При таком делении для северной части явно выделяются два максимума вертикальной скорости подъёма воды: март и октябрь. Для южной части максимумы приходятся на январь и октябрь. Если рассматривать Бенгельский апвеллинг как единую систему без деления на южную и северную части, то характер сезонного хода будет в основном определяться северной частью в силу его большей протяжённости и площади. Сезонный ход вертикальной скорости ветрового происхождения в зоне Бенгельского апвеллинга (без деления на северную и южную системы) характеризуется наличием двух экстремумов в период с октября по март. Это проявляется в преобладании полугодовой гармоник над годовой, что типично для тропической зоны и прилегающей к ней субтропической области Восточной Атлантики (Полонский, Серебренников, 2017).



*Рис. 5.*  $W_{EUI}$  ( $\times 10^{-7}$ , м/с, жирная линия) и  $W_{EP}$  ( $\times 8 \cdot 10^{-7}$ , м/с, тонкая линия) за период 1988–2017 гг., рассчитанные внутри климатических масок для южной ( $36\text{--}27^\circ$  ю. ш. (а)) и северной ( $27\text{--}13^\circ$  ю. ш. (б)) частей. Параметры рассчитывались внутри климатических масок как средние арифметические значения

Выберем точки раздела апвеллинга на  $3^\circ$  южнее и севернее рекомендованной широты. На *рис. 6* показан сезонный ход вертикальных скоростей подъёма воды при выбранной точке раздела  $30^\circ$  ю. ш. При таком делении искажаются графики для южной части апвеллинга, так как часть данных, находящихся на  $3^\circ$  широты ( $30\text{--}27^\circ$ ), попали в северную часть.



*Рис. 6.* То же, что и на *рис. 5*, только апвеллинг разделён на южной широте  $30^\circ$

На рис. 7 (точка раздела —  $24^\circ$  ю. ш.) для северной части апвеллинга сильно искажены значения максимумов в сезонном ходе вертикальных скоростей. Это связано с недостатком данных для северной части, которые попали в южную часть.

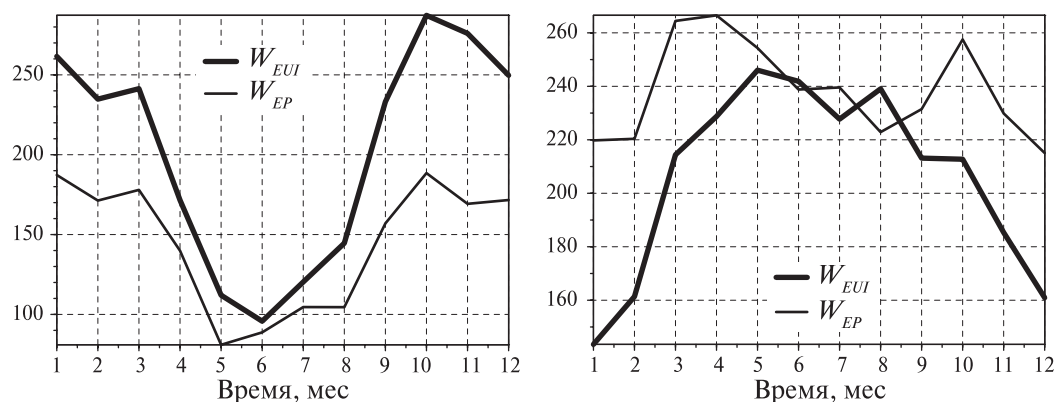


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, только апвеллинг разделён на южной широте  $24^\circ$

Таким образом, южная и северная части Бенгельского апвеллинга, разделённые на широте  $27^\circ$  ю. ш., показали наиболее достоверный сезонный ход для двух частей апвеллинга. Без деления апвеллинга на две части сезонный ход в большей степени будет определяться северной частью, как существенно большей, и максимумы будут в марте и октябре.

Интерпретация рис. 1 (как и остальных) может отличаться от авторской, но очевидно, что максимальные изменения рассматриваемых параметров происходили в диапазоне  $26\text{--}28^\circ$  ю. ш. и границу раздела надо выбирать здесь.

## Заключение

В данной работе была представлена методика определения точки раздела прибрежных апвеллингов по максимальному изменению их индексов за исследуемый 30-летний период на примерах Бенгельского, Канарского, Перуанского и Чилийского апвеллингов. Методика основана на выявлении изменений параметров  $W_{EUI}$ ,  $W_{EP}$  и  $TUI$  на всех широтах предполагаемого апвеллинга. Для разделения апвеллинга по сезонному ходу необходимо выявить широту, на которой графики параметров изменяют своё поведение (например, функция из возрастающей становится убывающей). Важно понимать, что параметр  $W_{EUI}$  имеет больший вес, чем  $W_{EP}$ , и они являются воздействующими на апвеллинговую систему, а  $TUI$  — это реакция системы (температурное проявление апвеллинга на поверхности моря), которая может давать искажённую картину из-за горизонтальной адвекции тёплых и холодных вод. В рассмотренной методике наиболее важной частью является графическое представление широтного распределения параметров  $W_{EUI}$ ,  $W_{EP}$  и  $TUI$ . Интерпретация графиков может отличаться от авторской. Автор выражает искреннюю благодарность рецензенту за ряд ценных замечаний, учтённых при работе над рукописью.

## Литература

1. Малинин В. Н., Чернышков П. П., Гордеева С. М. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 156 с.
2. Полонский А. Б., Серебренников А. Н. Межгодовые и внутримесячные флуктуации поля ветра и температуры поверхности океана в зоне Западно-Африканского апвеллинга по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2017. № 5. С. 14–19.
3. Серебренников А. Н. Улучшенная методика определения индексов прибрежных апвеллингов по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 44–51.

4. Чернышков П. П. Океанологические условия в районах Канарского и Бенгельского апвеллингов и прогнозирование состояния популяций пелагических рыб: дис. ... д-ра геогр. наук. Москва, 2006. 299 с.
5. Chaigneau A., Eldin G., Dewitte B. Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007) // *Progress In Oceanography*. 2009. V. 83. P. 117–123.
6. Chelton D. B., deSzoeke R. A., Schlax M. G., El Naggar K., Siwertz N. Geographical variability of the first-baroclinic Rossby radius of deformation // *J. Physical Oceanography*. 1998. V. 28. P. 433–460.
7. Escribano R., Daner D., Farías L., Gallardo V. A., González H. E., Gutiérrez D., Lange C., Morales C. E., Pizarro O., Ulloa O., Braun M. Biological and chemical consequences of the 1997–98 el niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis // *Deep Sea Research*. Pt. 2. 2004. V. 51. P. 2389–2411.
8. Gómez-Gesteira M., Moreira C., Alvarez I., deCastro M. Ekman transport along the Galician coast (north-west Spain) calculated from forecasted winds // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. C10005.
9. Shannon L. V., Nelson G. The South Atlantic: Present and Past Circulation, Chapter The Benguela: Large Scale Features and Processes and System Variability. Springer-Verlag, 1996. P. 163–210.
10. Stommel H. M. The Gulf Stream: A Physical and Dynamical Description, Berkeley: University of California Press, 1958. 202 p.
11. Tim N., Zorita E., Hünicke B. Decadal variability and trends of the Benguela Upwelling System as simulated in a high ocean-only simulation // *Ocean Scientific*. 2015. V. 11. P. 483–502.
12. Upwelling: Mechanisms, Ecological Effects and Threats to Biodiversity / eds. W. E. Fischer, A. B. Green. N. Y.: Nova Science Publishers, 2013. 98 p.

## The technique of spatial separation of the upwelling by seasonal character

A. N. Serebrennikov

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

The article describes the technique of separation of a coastal upwelling into parts which differ in seasonal variation. Average monthly values of the thermal index of an upwelling, vertical speed of Ekman transport and Ekman pump were calculated on the basis of daily satellite information on the sea surface temperature and surface wind. Summation of each of these values over the latitudes of the proposed upwelling in climatic masks made it possible to determine the latitudes where the upwelling seasonal variation should vary. The technique is considered on examples of Benguela, Canary, Peruvian and Chilean upwelling. For the considered upwelling the latitude calculated by this technique which presumably divides an upwelling by the nature of seasonal variability is given. As an example, for the southern and northern parts of the Benguela upwelling, we plotted seasonal changes in the average monthly climatic values of the vertical speed of Ekman parameters at different latitudes that divide an upwelling. The latitude chosen by the technique is close to the latitude, which some authors (Tim et al., 2015) propose to use as the border between the southern and northern Benguela upwelling systems.

**Keywords:** seasonal variability, coastal upwelling, thermal upwelling index, Ekman transport, Ekman pumping, climate mask

Accepted: 20.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-9-17

## References

1. Malinin V. N., Chernyshkov P. P., Gordeeva S. M., *Kanarskii apveling: krupnomasshtabnaya izmenchivost' i prognoz temperatury vody* (Canarian upwelling: large-scale variability and prediction of water temperature), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002, 156 p.



2. Polonskii A. B., Serebrennikov A. N., Mezhdogovye i vnutrimesyachnye fluktuatsii polya vetra i temperatury poverkhnosti okeana v zone Zapadno-Afrikanskogo apvellinga po sputnikovym dannym (Interannual and intra-monthly fluctuations of wind field and sea surface temperature in the West African upwelling region based on satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 5, pp. 14–19.
3. Serebrennikov A. N., Uluchshennaya metodika opredeleniya indeksov pribrezhnykh apvellinov po sputnikovym dannym (An improved technique for definition of coastal upwelling indices from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 44–51.
4. Chernyshkov P. P., *Okeanologicheskie usloviya v raionakh Kanarskogo i Bengel'skogo apvellinov i prognozirovaniye sostoyaniya populyatsii pelagicheskikh ryb: Dis. dokt. geogr. nauk* (Oceanological conditions in the areas of the Canary and Benguela upwelling and forecasting the status of populations of pelagic fish: Dr. geogr. sci. thesis), 2006, Moscow, 299 p.
5. Chaigneau A., Eldin G., Dewitte B., Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007), *Progress in Oceanography*, 2009, Vol. 83, pp. 117–123.
6. Chelton D. B., deSzoeke R. A., Schlax M. G., El Naggar K., Siwertz N., Geographical variability of the first-baroclinic Rossby radius of deformation, *J. Physical Oceanography*, 1998, Vol. 28, pp. 433–460.
7. Escribano R., Daner D., Farías L., Gallardo V. A., González H. E., Gutierrez D., Lange C., Morales C. E., Pizarro O., Ulloa O., Braun M., Biological and chemical consequences of the 1997–98 el niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis, *Deep Sea Research, Part II*, 2004, Vol. 51, pp. 2389–2411.
8. Gómez-Gesteira M., Moreira C., Alvarez I., deCastro M., Ekman transport along the Galician coast (northwest Spain) calculated from forecasted winds, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, C10005.
9. Shannon L. V., Nelson G., *The South Atlantic: Present and Past Circulation, Chapter The Benguela: Large Scale Features and Processes and System Variability*, Springer-Verlag, 1996, pp. 163–210.
10. Stommel H. M., *The Gulf Stream: A Physical and Dynamical Description*, Berkeley: University of California Press, 1958, 202 p.
11. Tim N., Zorita E., Hünicke B., Decadal variability and trends of the Benguela Upwelling System as simulated in a high ocean-only simulation, *Ocean Scientific*, 2015, Vol. 11, pp. 483–502.
12. *Upwelling: Mechanisms, ecological effects and threats to biodiversity*, W. E. Fischer, A. B. Green (eds.), New York: Nova Science Publishers, 2013, 98 p.