

## Улучшенная методика определения индексов прибрежных апвеллингов по спутниковым данным

А. Н. Серебренников

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

В статье рассмотрена улучшенная методика определения индексов прибрежных апвеллингов по спутниковым картам температуры поверхности моря и приповерхностного ветра. Основным отличием данной методики является определение параметров апвеллинга по ежемесячным климатическим маскам. Подробно рассмотрен алгоритм выбора ежемесячных климатических масок. Приведено обоснование выбора удалённой от апвеллинговых вод области в открытом море для расчёта термического индекса апвеллинга и его модификаций. В дополнение к общепринятым индексам апвеллинга (термический и экмановский), введены новые индексы: накопительный и видимая мощность апвеллинга, позволяющие учитывать площадь поверхности апвеллинговых вод. Методика рассмотрена на примере Канарского апвеллинга. Данная методика позволяет определить границы апвеллинга в каждый климатический месяц, а значит, более точно вычислить его индексы и параметры среды, находящиеся в области апвеллинга (приповерхностный ветер, уровень моря, геострофическое течение и т. д.).

**Ключевые слова:** термический индекс апвеллинга, экмановский транспорт, экмановская накачка, температура поверхности моря, приповерхностный ветер

Одобрена к печати: 23.08.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-44-51

### Введение

Прибрежный апвеллинг формируется при наличии благоприятной вдольбереговой компоненты ветра. Условием его возникновения в Северном полушарии является направление компоненты ветра с севера на юг при расположении берега слева. Причины возникновения апвеллинга и методы вычисления его индексов достаточно хорошо изучены (Полонский, Серебренников, 2017; Stopper et al., 2014; Hagen, 2001).

Размеры апвеллинговой зоны зависят от различных факторов, в числе которых ветровые характеристики (скорость, направление, продолжительность), вид береговой линии, топография дна, взаимодействие с окружающими водами. В прибрежных районах поднявшиеся на поверхность более плотные холодные воды создают горизонтальный градиент по плотности и температуре (апвеллинговый фронт), который определяет конфигурацию апвеллинговой зоны.

На Международной конференции по компьютерным системам и приложениям в Марокко (Aouini et al., 2016) был предложен усовершенствованный метод расчёта индекса апвеллинга прибрежных районов с использованием изображений температуры поверхности моря (sea surface temperature, SST). Этот метод основан на использовании алгоритма нечёткой кластеризации (fuzzy c-means algorithm) для нахождения областей с однородными пикселями, чтобы в дальнейшем выделить регион с апвеллинговыми водами.

В настоящей работе предлагается улучшенная методика выделения апвеллинга, основанная на построении ежемесячных климатических масок, внутри которых рассчитываются его параметры. Тем самым максимально удаляются из расчёта характеристик апвеллинга области с внеапвеллинговыми водами. В ходе исследования были построены межгодовые дисперсии SST для каждого среднеклиматического месяца, по данным которых видно, что максимальные межгодовые колебания температуры происходят внутри климатических масок.

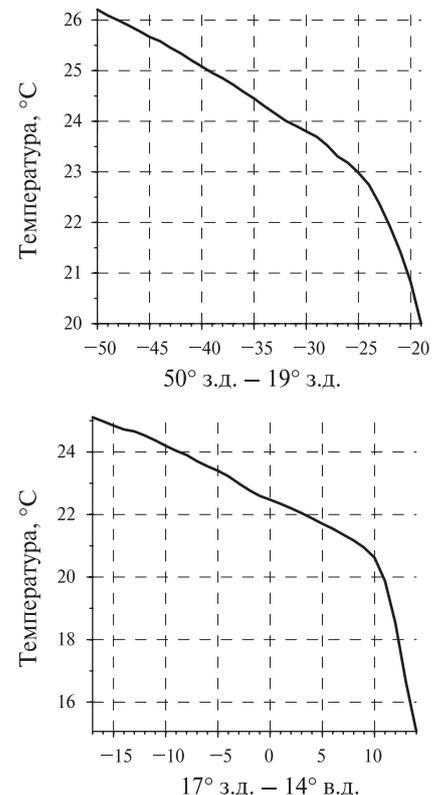
Идея работы заключается в том, чтобы рассчитывать среднемесячные характеристики апвеллинга только в ограниченных по площади областях, где наблюдались значимые температурные проявления апвеллинга. Поля ежемесячных температур за период 1985–2017 гг.

(климатические нормы за месяц) характеризуются ярко выраженными градиентами в отличие от ежедневных и месячных карт. На этих полях можно выделить климатические области (маски), которые будут ограничивать апвеллинговые зоны.

Улучшенная методика рассматривается на примере Канарского апвеллинга (10–36° с. ш. и 5–30° з. д.). В ходе работы были проанализированы ежедневные карты SST с пространственным разрешением 0,05° 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 приводного ветра за 30-летний период (с 1988 по 2017 г.), опубликованные на сайте NCEP (National Centers for Environmental Prediction).

### Методика определения климатических масок апвеллинга

Основная идея алгоритма нахождения апвеллинга заключается в том, что фронты в температурных изображениях обычно представляют собой тонкие полосы, разделяющие области почти постоянной температуры (Ogam et al., 2008). Исходя из этого, границу апвеллинга можно найти по его максимальному температурному градиенту. Определим максимальные температурные градиенты для всех географических широт исследуемого региона каждого климатического месяца. Для визуального контроля предлагается рассчитывать месячные климатические термические индексы апвеллинга (thermal upwelling index, TUI). Для расчёта TUI необходимо из SST предполагаемой апвеллинговой зоны вычесть средние значения температуры, полученные в удалённой от апвеллинга (оффшорной) зоне для всех широт исследуемой области. Недостатком этого метода является субъективный выбор удалённой зоны. В достаточно большом количестве работ авторы выбирают начало этой зоны от 400 до 1500 км от берега (Santos et al., 2005). Данные исследования показали, что чем дальше оффшорная зона отстоит от берега, тем больше получается TUI. Для наглядности были построены графики разрезов температурных полей с разрешением 0,05° за все климатические месяцы — как в широтных пределах предполагаемой апвеллинговой зоны, так и вне её. Расстояние по долготе было выбрано 32°, начиная с открытого океана и заканчивая береговой линией. Значения температур на графике являются осреднёнными в пределах одноградусной сетки по широте и долготе. Графики разрезов, сделанные для Канарского апвеллинга на 21° с. ш. в климатическом июне и для Бенгельского апвеллинга на 26° ю. ш. в климатическом апреле, приведены на *рис. 1*. Восточнее 25° з. д. для Канарского апвеллинга (10° в. д. для Бенгельского апвеллинга) поверхностная температура воды понижается заметно сильнее, чем на остальных практически линейных участках графиков. Таким образом, можно предположить, что 25° з. д. и 10° в. д. для этих апвеллингов в данных реперных широтах и в заданные месяцы являются точками начала апвеллинговой зоны. Оффшорную зону для расчёта TUI выбираем шириной 2°, западнее начала апвеллинговой зоны на 1°. На остальных широтах оффшорную зону будем выбирать на таком же расстоянии от берега, что и на реперной широте. Для всех прибрежных ветровых апвеллингов оффшорную зону будем выбирать подобным образом.



*Рис. 1.* Разрезы среднемесячных полей SST в градусах Цельсия за период 1985–2017 гг. за июнь на 21° с. ш. для Канарского апвеллинга (*вверху*) и за апрель на 26° ю. ш. для Бенгельского апвеллинга (*внизу*)

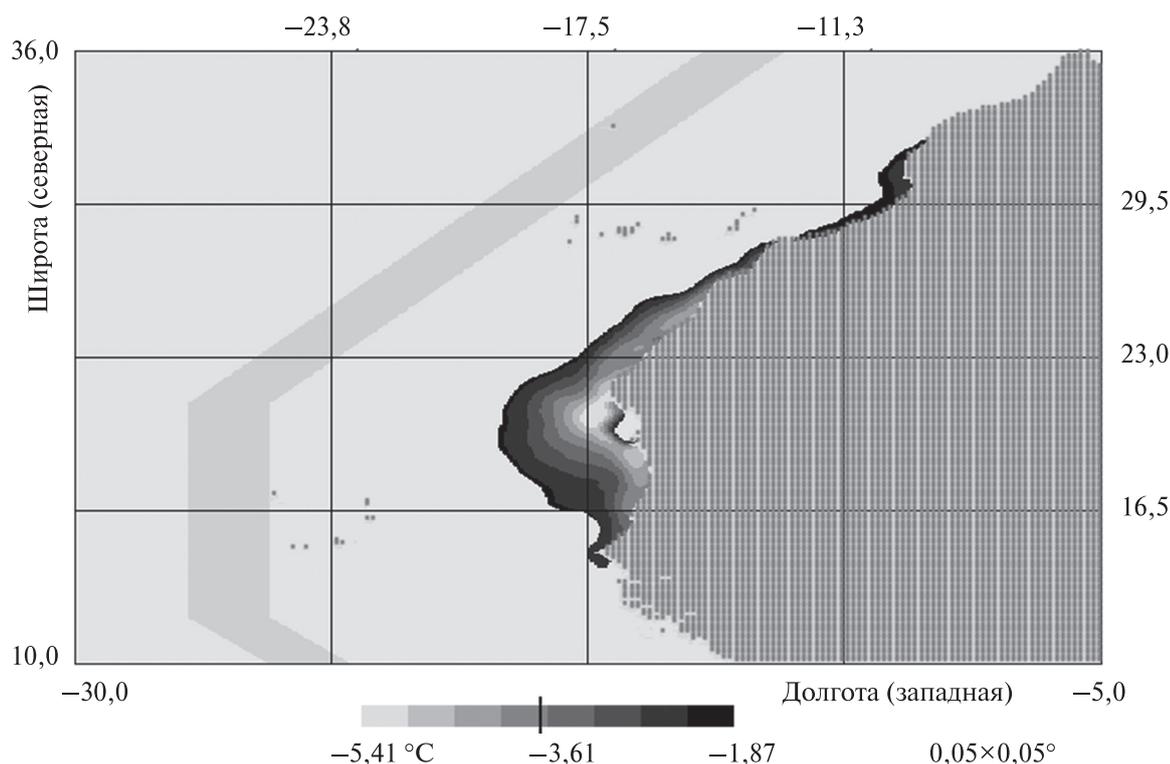


Рис. 2. Канарский апвеллинг. Среднее многолетнее значение TUI в мае за период 1985–2017 гг. Серой ломаной полосой показана оффшорная область для расчёта TUI

Почти линейный подъём температуры поверхности воды на широтах апвеллинга объясняется постоянным на климатическом масштабе сгоном холодных апвеллинговых вод. Если выбирать прямоугольную оффшорную зону без учёта конфигурации берега, то расстояние от отдельных участков береговой линии до оффшорной зоны может отличаться до  $10^\circ$ . Для минимизации ошибки предлагается выбирать такую конфигурацию оффшорной зоны, при которой расстояние до берега будет примерно одинаковым (рис. 2).

Далее необходимо выделить границы апвеллинга по максимальному температурному градиенту. По спутниковым данным определить их не удаётся, так как максимальный градиент неизменно оказывается у самой береговой черты, что не позволяет построить маску из-за практически отсутствующей апвеллинговой зоны. Однако, если ограничить область поиска максимального градиента по долготе и искать его на определённой (реперной) широте и в заданный (реперный) месяц, возможно выбрать вариант, при котором сгонные холодные воды будут отсечены от апвеллинговых вод и при этом область апвеллинга будет максимальной. На рис. 1 видно, что максимальный градиент необходимо искать в диапазоне от  $25^\circ$  до  $20^\circ$  з. д. для Канарского апвеллинга и от  $10^\circ$  до  $13^\circ$  в. д. для Бенгельского апвеллинга.

Найти область, занимаемую апвеллингом в определённый климатический месяц, и определить маску можно методом, основанным на следующем предположении. Температура поверхности воды в зоне апвеллинга должна быть ниже температуры в удалённой зоне на некоторую величину  $TL$ . Для наглядности составим формулу:

$$AMT(m, k) \leq AMTL\_offshore(m, \varphi) - TL(m, \varphi),$$

где  $AMT(m, k)$  — климатическая температура для месяца  $m$  и точки пространства  $k$  в районе предполагаемого апвеллинга;  $AMTL\_offshore(m, \varphi)$  — климатическая температура для месяца  $m$  и широты  $\varphi$  в удалённой от апвеллинга оффшорной области;  $TL(m, \varphi)$  — температурный параметр, ограничивающий апвеллинговую область. При этом, чем больше  $TL$ , тем сильнее ограничена апвеллинговая область и наоборот.  $TL(m, \varphi)$  можно представить как некую постоянную величину, умноженную на зависимый от текущего месяца и широты пара-

метр:  $TL(m, \varphi) = TL_{const} \times P(m, \varphi)$ , где  $TL_{const}$  — это температурный перепад между апвеллинговыми и оффшорными водами в реперный месяц на реперной широте; параметр  $P(m, \varphi)$  находится из соотношения температуры  $AMTL_{offshore}(m, \varphi)$  к температуре  $AMTL_{offshore}(m_{fix}, \varphi_{fix})$  в данный реперный месяц ( $m_{fix}$ ) на выбранной реперной широте ( $\varphi_{fix}$ ). Соотношения вычисляются для каждого месяца и для всех широт.

Для того чтобы определить  $TL_{const}$ , необходимо найти максимальный градиент в диапазоне от  $25^\circ$  до  $20^\circ$  з. д. Были выбраны реперный месяц июнь и реперная широта  $21^\circ$ . На основании данного критерия (отделение апвеллинговых вод от сгонных при максимальной области TUI) был найден температурный фронт с максимальным градиентом. Температура этого фронта принята за границу апвеллинга в реперной точке ( $T_{grad}$ ). Отсюда получаем:

$$TL_{const} = AMTL_{offshore}(m, \varphi) - T_{grad}.$$

Параметр  $TL_{const}$  в реперной точке получился равным  $2,24^\circ\text{C}$ . Значения  $TL(m, \varphi)$  оказались в диапазоне  $1,55$ – $2,72^\circ\text{C}$ .

Чем меньше  $TL$ , тем большую площадь будет занимать климатический TUI, который фактически является маской апвеллинга. Внутри маски будем рассчитывать сопутствующие апвеллингу параметры (ветер, уровень моря и т. п.). Климатический TUI рассчитывался для 12 месяцев, а среднемесячный — для всех месяцев за весь исследуемый период (33 года). Найденные параметры апвеллинга в областях TUI (маски апвеллинга) согласуются с описанными в литературе. Например, известно, что ширина апвеллинга в районе мыса Cap Blanc (Канарский апвеллинг) в январе должна составлять примерно 300 км (Cushing, 1969), что подтверждается полученными данными.

## Результаты

Улучшенная методика определения индексов апвеллингов рассматривалась на примере сезонного изменения Канарского апвеллинга. Для учёта не только общей температуры апвеллинга но и его площади, был введён накопительный индекс апвеллинга (cumulative upwelling index, CUI). При расчёте стандартного значения TUI необходимо вычислить среднее значение температуры в зоне предполагаемого апвеллинга. Среднее значение TUI не зависит от площади апвеллинга. При расчёте CUI складываются все отрицательные значения TUI в ожидаемых областях апвеллинга и получается суммарное значение индекса температуры для всей фактической площади апвеллинга. Для учёта площади каждого пиксела в квадратных километрах и его температуры применяем следующую формулу  $\hat{CUI} = \sum_{i=1}^n (tS)$ , где  $t$  — индекс TUI в точке  $i$  в градусах Цельсия;  $n$  — количество точек в зоне апвеллинга с TUI менее  $0^\circ\text{C}$ ;  $S$  — площадь точки в квадратных километрах с учётом широты местности и пространственного разрешения.

Для анализа и сравнения апвеллингов была предложена видимая мощность апвеллинга (visible upwelling power, VUP), являющаяся модификацией TUI. Модификация называется «видимой», так как по космическим данным апвеллинг наблюдается по температурному проявлению на поверхности воды. VUP показывает суммарную для всей площади апвеллинга температуру. В отличие от CUI в VUP температура возводится в квадрат для усиления больших отрицательных значений (меньше  $-1^\circ\text{C}$ ), так как они лучше характеризуют интенсивность апвеллинга. Для VUP получаем следующую формулу:  $VUP = \sum_{i=1}^n (t^2S)$ , где  $t$  — TUI в точке  $i$  в градусах Цельсия;  $n$  — количество точек в зоне апвеллинга с TUI меньше  $0^\circ\text{C}$ ;  $S$  — площадь точки в квадратных километрах с учётом широты местности и пространственного разрешения. Наблюдаемое развитие апвеллинга происходит как за счёт снижения температуры поверхности воды, которая не может стать меньше температуры глубинных вод, так и за счёт расширения площади холодных поверхностных вод.

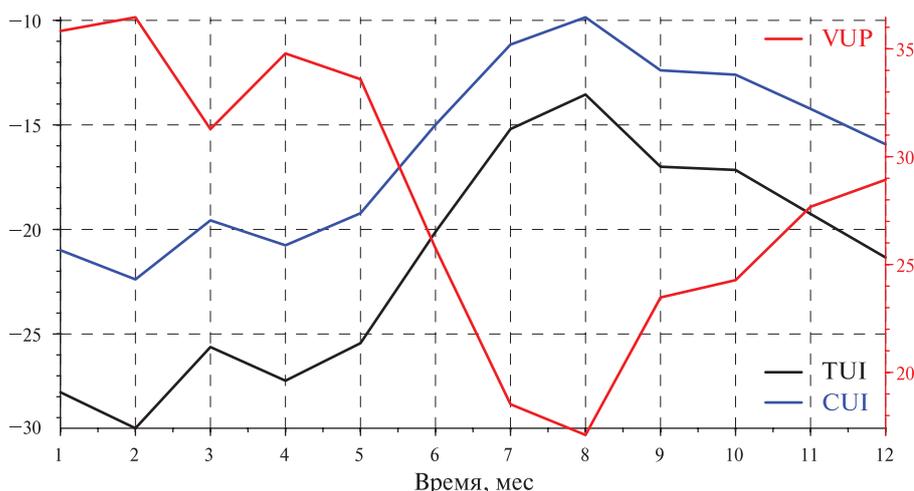


Рис. 3. Среднемесячные значения TUI (°C×10, чёрная линия), CUI (°C·км²×2·10⁶, синяя линия) и VUP (°C²·км²×10⁷, красная линия и шкала) за период 1985–2017 гг., рассчитанные внутри ежемесячных климатических масок

При расчёте климатического TUI для каждой месячной маски надо учесть, что площадь, а значит и число точек в масках, будут различны. Для корректного расчёта суммарную температуру внутри маски необходимо делить на постоянную величину, которая в данном случае будет равна количеству точек в максимальной маске. Вычисления средних значений любых других параметров (скорость ветра, уровень моря и т. д.) необходимо проводить внутри максимальной по площади маске, выбранной из 12 климатических масок. На рис. 3 представлены изменения ежемесячных климатических значений TUI, CUI и VUP для всей области Канарского апвеллинга (максимальный подъём воды был в феврале, а минимальный — в августе).

Интенсивность апвеллинга характеризуется не только термическим индексом апвеллинга, отражающим контраст температуры поверхности океана между прибрежными апвеллинговыми водами и водами открытого океана, но и величиной экмановского переноса, которая зависит от касательного напряжения трения ветра, вида береговой линии и параметра Кориолиса. Эта характеристика называется экмановским индексом прибрежного апвеллинга (Ekman upwelling index, EUI). EUI вычисляется из экмановского транспорта ( $Q$ ), который создаётся касательным напряжением трения ветра (Cropper et al., 2014; Gómez-Gesteira et al., 2006; Santos et al., 2012), по формуле:

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

где  $Q_x$  и  $Q_y$  — зональная и меридиональная компоненты экмановского транспорта;  $\varphi$  — угол наклона береговой линии к горизонтали. Береговая линия части северо-западного побережья Африки (Канарский апвеллинг) была аппроксимирована тремя прямыми отрезками с углами наклона 135, 90 и 50°. Положительное значение EUI создаёт благоприятные условия для апвеллинга, отрицательное — для даунвеллинга.

Помимо рассмотренного выше экмановского переноса, по которому был построен EUI, ветровой апвеллинг может развиваться и за счёт экмановской накачки, связанной с положительной завихренностью поля напряжения трения ветра. Экмановская накачка приводит к дивергенции водной поверхности, тем самым увеличивая вертикальную составляющую скорости течений, что приводит к усилению апвеллинга. Скорость экмановской накачки  $W_E$  (скорость подъёма воды при положительном значении) можно вычислить из компонентов экмановского транспорта по следующей формуле:

$$-W_E = \frac{\partial(Q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Q_y)}{\partial y}.$$

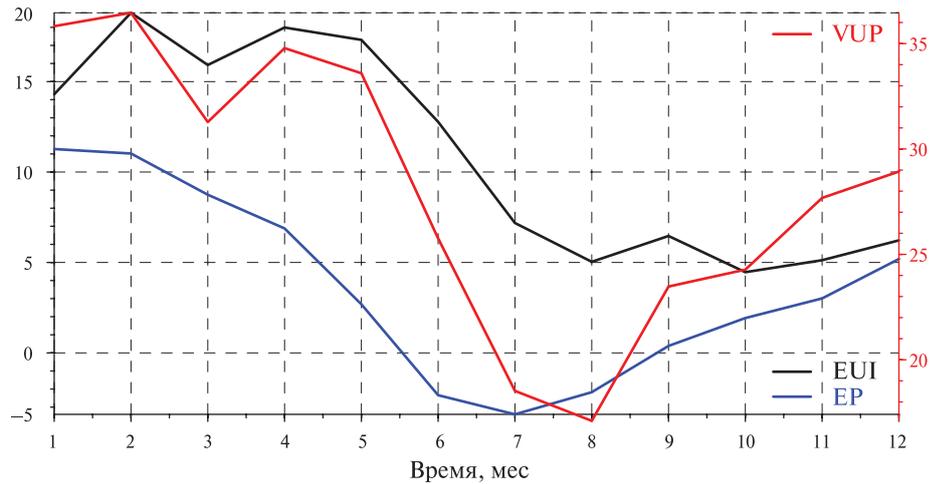


Рис. 4. Среднемесячные значения экмановского индекса апвеллинга EUI ( $\text{м}^2/\text{с} \times 20$ , чёрная линия), экмановской скорости накачки  $W_E$  ( $\text{м}/\text{с} \times 10^{-7}$ , синяя линия EP и шкала) и видимой мощности апвеллинга VUP ( $^\circ\text{C}^2 \cdot \text{км}^2 \times 10^7$ , красная линия) за период 1985–2017 гг., рассчитанные внутри ежемесячных климатических масок

Положительная завихренность напряжения трения ветра на поверхности моря вызывает дивергенцию и, соответственно, апвеллинг. По сравнению с экмановским транспортом экмановская накачка даёт тот же или даже больший вклад в апвеллинговые процессы во многих регионах (Taufikurahman, Hidayat, 2017).

На рис. 4 показаны климатические значения EUI,  $W_E$  и VUP, рассчитанные внутри ежемесячных климатических масок. Значения  $W_E$  (или экман pumping, EP) лежат в диапазоне  $(-3,4 \dots 11,27) \times 10^{-7}$  м/с. Значения EUI рассчитываются из эффективного экмановского ветра и занимают диапазон  $(0,22 \dots 0,94)$   $\text{м}^2/\text{с}$ . Значения VUP находятся в диапазоне  $(1,71 \dots 3,65) \cdot 10^6$   $^\circ\text{C}^2 \cdot \text{км}^2$ . Для всех трёх графиков можно выделить общие закономерности, которые показывают усиление апвеллинга в зимне-весенний период и ослабление — в летний.

## Заключение

На примере Канарского апвеллинга рассмотрена улучшенная методика определения индексов прибрежных апвеллингов. По данной методике средние значения индексов апвеллинга и любых других параметров, связанных с апвеллингом (температура поверхности воды, скорость приповерхностного ветра, уровень моря, геострофическое течение и т. д.), определяются внутри ежемесячных климатических масок. Улучшенная методика позволяет точнее вычислить границы апвеллинга в каждый климатический месяц и точнее рассчитать его индексы и другие параметры.

Одной из важнейших характеристик ветровых прибрежных апвеллингов является площадь его вод. Наблюдаемое усиление апвеллинга происходит за счёт температуры и объёма поднимаемых более холодных глубинных вод, которые на поверхности моря создают температурный контраст между апвеллинговыми и окружающими водами. Для учёта площади апвеллинговых вод были предложены модификации термического индекса апвеллинга: накопительный индекс и видимая мощность. Эти индексы учитывают температуру и площадь каждой точки апвеллинга, причём для VUP температура возводится в квадрат для более значимого отделения глубинных вод от сгонных. Оффшорная зона, используемая для расчёта TUI и его модификаций (CUI, VUP), бралась равноудалённой от береговой линии (см. рис. 2). При вычислении границ апвеллинговых вод, по которым строились климатические маски, был использован тот факт, что график климатической SST имеет точку перегиба на определённой долготе (см. рис. 1), начиная с которой температура воды более резко понижается при приближении к берегу.

Таким образом, улучшенная методика позволяет более точно определять среднемесячные климатические границы апвеллинга и точнее вычислять его индексы и параметры среды, находящиеся в его области.

## Литература

1. 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.
2. Aouni A. E., Minaoui K., Tamim A., Daoudi K., Yahia H., Mohammed D. A. An improved method for accurate computation of coastal upwelling index using Sea Surface Temperature Images // 13<sup>th</sup> ACS/IEEE Intern. Conf. Computer Systems and Applications. Morocco, 2016.
3. 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. Pt. 1. V. 86. P. 94–111.
4. Cushing D. H. Upwelling and Fish Production // FAO Fisheries Technical Paper. Rome, 1969. No. 84. 38 p.
5. 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. V. 111. C10005. DOI: 10.1029/2005JC003331.
6. Hagen E. Northwest African upwelling scenario // Oceanologica Acta. 2001. V. 24. Suppl. 1. P. 113–128.
7. Oram J. J., McWilliams J. C., Stolzenbach K. D. Gradient-based edge detection and feature classification of sea-surface images of the Southern California Bight // J. Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112(5). P. 2397–2415.
8. Santos A. M. R., Kazmin A. S., Peliz A. Decadal changes in the Canary upwelling system as revealed by satellite observations: Their impact on productivity // J. Marine Research. 2005. V. 63. P. 359–379.
9. Santos F., deCastro M., Gomez-Gesteira M., Alvarez I. Differences in coastal and oceanic SST warming rates along the Canary upwelling ecosystem from 1982 to 2010 // Continental Shelf Research. 2012. V. 47. P. 1–6.
10. Taufikurrahman Q., Hidayat R. Coastal upwelling in Southern Coast of Sumbawa Island, Indonesia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. V. 54. 012075.

## An improved technique for the retrieval of coastal upwelling indices from satellite data

A. N. Serebrennikov

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

The paper considers an improved technique for the retrieval of coastal upwelling indices from satellite maps of sea surface temperature and near-surface wind. The main distinguishing feature of this technique is the determination of parameters of upwelling by monthly climatic masks. The algorithm for selecting monthly climatic masks is considered in detail. A justification of the choice of an area remote from the upwelling waters in the open sea for calculation of the thermal index of upwelling and its modifications is given. In addition to the generally accepted upwelling indices (thermal and Ekman), new indices were introduced: the cumulative and visible upwelling power, that allow to consider the surface area of upwelled waters. The technique is considered by the example of the Canary upwelling. This technique allows defining upwelling borders in each climatic month, and therefore more precisely calculate its indices and parameters of the environs of the upwelled area (near-surface wind, sea level, geostrophic current, etc.).

**Keywords:** thermal upwelling index, Ekman transport, Ekman pump, sea surface temperature, near-surface wind

Accepted: 23.08.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-44-51

## References

1. 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.
2. Aouni A. E., Minaoui K., Tamim A., Daoudi K., Yahia H., Mohammed D. A., An improved method for accurate computation of coastal upwelling index using Sea Surface Temperature Images, *13<sup>th</sup> ACS/IEEE Intern. Conf. Computer Systems and Applications*, Morocco, 2016.
3. 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, Vol. 86, pp. 94–111.
4. Cushing D. H., Upwelling and Fish Production, *FAO Fisheries Technical Paper*, Rome, 1969, No. 84, 38 p.
5. 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, DOI: 10.1029/2005JC003331.
6. Hagen E., Northwest African upwelling scenario, *Oceanologica Acta*, 2001, Vol. 24, Suppl. 1, pp. 113–128.
7. Oram J. J., McWilliams J. C., Stolzenbach K. D., Gradient-based edge detection and feature classification of sea-surface images of the Southern California Bight, *J. Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112(5), pp. 2397–2415.
8. Santos A. M. R., Kazmin A. S., Peliz A., Decadal changes in the Canary upwelling system as revealed by satellite observations: Their impact on productivity, *J. Marine Research*, 2005, Vol. 63, pp. 359–379.
9. Santos F., deCastro M., Gomez-Gesteira M., Alvarez I., Differences in coastal and oceanic SST warming rates along the Canary upwelling ecosystem from 1982 to 2010, *Continental Shelf Research*, 2012, Vol. 47, pp. 1–6.
10. Taufikurahman Q., Hidayat R., Coastal upwelling in Southern Coast of Sumbawa Island, Indonesia, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, Vol. 54, 012075.