

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АПВЕЛЛИНГОВ  
ПО ТЕРМИЧЕСКОМУ ИНДЕКСУ

© 2021 г. А. Б. Полонский<sup>а, \*</sup>, А. Н. Серебренников<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь, Россия

\*E-mail: apolonsky5@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2020 г.

В статье рассматривается усовершенствованная методика вычисления амплитудно-фазовых характеристик сезонного цикла и долгопериодных тенденций интенсивности апвеллинга, основанная на анализе минимальных (максимальных по абсолютной величине) значений термического индекса апвеллинга (ТИА). ТИА рассчитывается как разность спутниковой температуры поверхности между прибрежной и удаленной мористой зонами в районах крупномасштабных океанических апвеллингов. С помощью предложенной методики рассчитаны параметры климатической изменчивости ТИА для Восточных пограничных апвеллинговых систем (ВПАС). Сезонные вариации рассчитанного таким образом ТИА лучше согласуются с внутригодовой изменчивостью восходящих движений ветрового происхождения, чем изменения усредненных в климатических масках значений ТИА. Долговременные тренды ТИА, полученные по модифицированной методике, более значимы, чем рассчитанные в климатических масках и подтверждают интенсификацию ВПАС в последние ~35 лет.

*Ключевые слова:* апвеллинг, температура поверхности океана, термический индекс апвеллинга, сезонный цикл, межгодовая изменчивость, долгопериодные тренды

DOI: 10.31857/S0205961421010085

## ВВЕДЕНИЕ

Восточные пограничные апвеллинговые системы (ВПАС, в англоязычной литературе – Eastern Boundary Upwelling Systems, EBUS) являются одним из наиболее продуктивных морских экосистем в мире и давно признаны основными рыбопромысловыми районами Мирового океана. Они вносят несоразмерный (по сравнению с долей площади их акватории в общей площади поверхности Мирового океана) вклад в глобальную продуктивность океана (Pauly, Christensen, 1995). Эти системы напрямую влияют на жизнедеятельность не менее 80 млн человек, живущих вдоль побережий, примыкающих к области апвеллингов (IPCC, 2014; Carr, 2002; Carr, Kearns, 2003; Chavez, Messie, 2009).

Высокий уровень продуктивности ВПАС обусловлен наличием крупномасштабных атмосферных циркуляционных систем, благоприятствующих формированию устойчивых вдольбереговых ветров в окрестности ВПАС, которые вызывают подъем более холодных подповерхностных вод к поверхности. Некоторую роль в развитии апвеллинга играет завихренность в поле ветра, генерирующая дивергенцию экмановских течений и, соответственно, подъем вод (Upwelling, 2013; По-

лонский, Серебренников, 2020). В результате развития апвеллинга холодные воды, богатые питательными веществами, поднимаются в фотическую зону и создают области повышенной биопродуктивности (Huyer, 1983; Upwelling, 2013).

Несмотря на множество опубликованных работ, посвященных анализу ВПАС (например, (Bakun, 1990; Bakun et al., 2015; Belmadani et al., 2014; García-Reyes et al., 2015; Полонский, Серебренников, 2019, 2020; Polonsky, Serebrennikov, 2019)), до сих пор отсутствует единое мнение о межгодовых тенденциях в интенсивности различных апвеллингов этой системы. Существуют даже значительные различия в характеристиках сезонного цикла интенсивности апвеллингов, выделенных различными авторами. Неспособность достичь согласия в этих вопросах связана с объективными причинами: недостаточной продолжительностью ветровых и температурных временных рядов в окрестности ВПАС, низким разрешением данных по приповерхностному ветру и, особенно, отсутствием качественных данных о ветре в непосредственной близости к берегу (фактически, на расстоянии порядка радиуса деформации Россби от береговой черты), а также использова-

нием недостаточно надежной методики выделения апвеллингов.

В настоящей работе будет рассмотрена модифицированная методика идентификации зон апвеллинга и его интенсивности, основанная на анализе минимальных (максимальных по абсолютной величине) значений ТИА. С помощью этой методики будет уточнен сезонный цикл и оценены долгопериодные тенденции интенсивности Калифорнийской, Перуанской, Чилийской, Канарской и Бенгальской систем апвеллингов, составляющих ВПАС.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

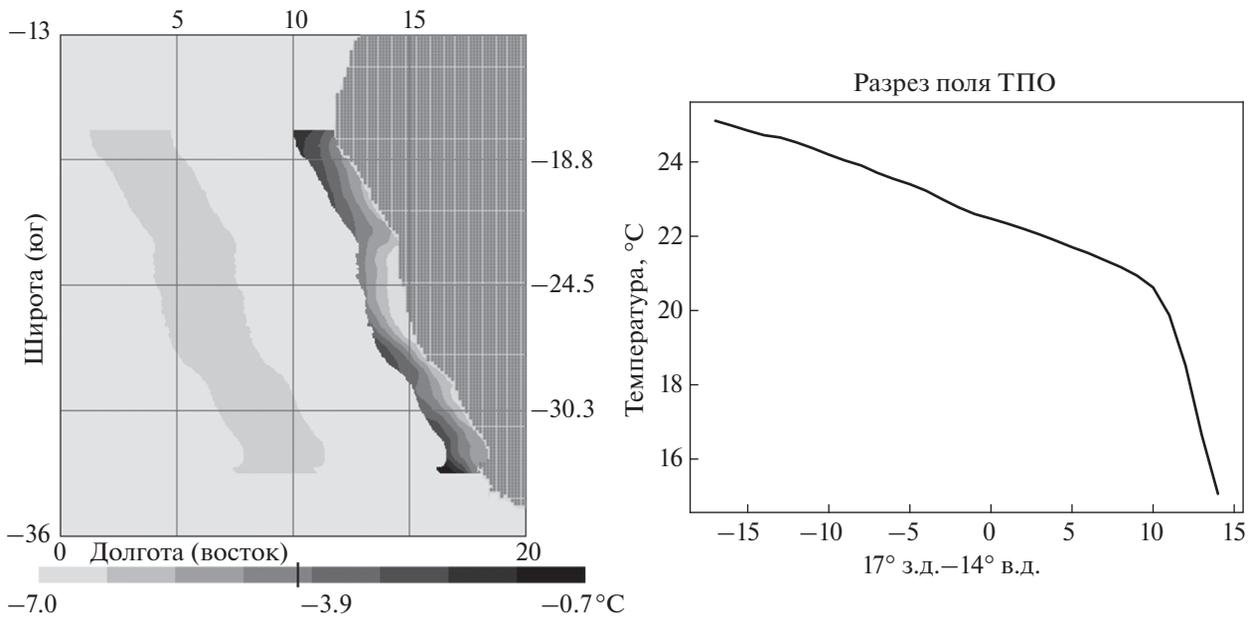
В ходе работы были проанализированы ежедневные карты температуры поверхности океана (ТПО) с пространственным разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  за 35-летний период (с 1985 по 2019 гг.), взятые с сайта CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service).

В принципе, интенсивность прибрежного апвеллинга определяется скоростью подъема воды, зависящей от пространственно-временной структуры приповерхностного ветра. Расчет скорости подъема воды обычно сводится к вычислению касательного напряжения вдоль берегового ветра, положительной (направленной вверх) завихренности в поле горизонтально-неоднородного регионального ветра и применения экмановской теории. Вместе с тем, апвеллинг зависит от глубины места, характера береговой линии, топографии дна, расстояния от берега, структуры океанической циркуляции и множества других факторов. Поэтому иногда используют трехмерные модели высокого разрешения, позволяющие учесть максимально возможное число факторов, влияющих на апвеллинг. Эффективность модельных расчетов ограничивается отмеченным во введении отсутствием граничных условий необходимого пространственно-временного разрешения. Поэтому характеристики апвеллинга традиционно оцениваются по более многочисленным данным о ТПО с помощью ТИА, представляющего собой разность ТПО в прибрежной и удаленной мористой зонах. Области минимальных (с учетом знака) величин ТИА обычно ассоциируют с зонами прибрежного апвеллинга. В настоящей работе сезонный цикл и тренды межгодовой изменчивости апвеллингов также оценивались по минимальным значениям ТИА.

Необходимо вместе с тем подчеркнуть, что ТИА представляет собой косвенную характеристику апвеллинга. Действительно, наблюдаемое уменьшение ТПО в прибрежной зоне не является исключительно проявлением апвеллинга. Определить сезонный цикл и оценить тренд в интенсивности подъема вод для большинства апвел-

лингов по температурным проявлениям на поверхности океана достаточно сложно из-за большой изменчивости ТПО, обусловленной адвекцией теплых и холодных вод в апвеллинговую область, порождаемой ветровыми и квазигеострофическими потоками, мезомасштабными течениями, захваченными волнами и т.п. Однако можно использовать тот факт, что вертикальный градиент температуры воды в термоклине под верхним перемешанном слоем (ВПС) много больше горизонтального термического градиента в ВПС. При этом по сравнению с анализируемыми климатическими временными масштабами перемешивание в ВПС происходит практически мгновенно. Вследствие этого в районе апвеллинга можно выделить участки с минимальными значениями ТИА, которые обычно приурочены к областям наиболее интенсивного подъема вод. Для оценки изменчивости интенсивности апвеллинга по минимальным ТИА не нужно находить климатические маски (как это предлагалось в работе (Серебрянников, 2018)). Идея работы (Серебрянников, 2018) заключалась в том, чтобы рассчитывать и анализировать среднемесячные характеристики апвеллинга в областях, в которых наблюдались значимые температурные проявления апвеллинга, названные “масками”. Площадь этих масок непостоянна, поскольку маски ограничиваются береговой чертой (с одной стороны) и областью с резким изменением горизонтального градиента ТПО (с другой), конфигурация которой изменяется от одного месяца к другому. Поэтому интенсивность апвеллинга, усредненная по площади маски, изменяется от месяца к месяцу и зависит не только от скорости восходящих движений, но и от площади самой маски. В настоящей работе предлагается анализировать минимальные величины ТИА в области, ограниченной с одной стороны береговой линией, а с другой – воображаемой кривой, удаленной от берега на расстояние 1.75 градуса долготы. Ширина этой области гарантированно превышает величину радиуса деформации Россби в районе ВПАС, которая определяет характерный размер апвеллинговой зоны (Гилл, 1986; Chelton et al., 1988).

Для расчета ТИА в области развития апвеллинга необходимо на каждой широте из температуры поверхности воды в зоне апвеллинга вычесть ТПО в удаленной мористой зоне. При расчетах характеристик осредненного сезонного цикла и более низкочастотных изменений апвеллинга обычно используются среднемесячные данные. Такой подход будет использован и в настоящей работе. В качестве типичной среднемесячной величины ТПО в удаленной мористой зоне нами использовались медианные значения, рассчитанные по ежедневным данным для каждого месяца. Эти величины, как известно, более устойчивы к



**Рис. 1.** Распределение ТИА в области Бенгельского апвеллинга в климатическом апреле и расположение удаленной мористой зоны (показана серым цветом слева). Разрез поля ТПО по нормали к берегу за климатический апрель на 26° ю.ш. для Бенгельского апвеллинга дан справа.

экстремальным выбросам и могут существенно отличаться от среднемесячных величин, полученных простым арифметическим осреднением, если гистограмма ТПО плохо аппроксимируется вероятностным распределением Гаусса. Такая ситуация типична, например, для восточной части экваториальной зоны Тихого океана, где преобладает бимодальная структура в гистограммах ТПО, что обусловлено регулярно повторяющимися аномальными событиями противоположного знака – Эл-Ниньо и Ла-Ниньо (Philander, 1990).

Методика выбора мористой зоны и расчета ТИА демонстрируется на рис. 1 на примере Бенгельского апвеллинга. На этом рисунке (справа) хорошо видно, что на климатическом разрезе ТПО поперек зоны апвеллинга восточнее 10° в. д. горизонтальный градиент ТПО резко повышается по сравнению с более западной частью разреза. Ясно таким образом, что удаленная мористая зона должна лежать западнее этой долготы. Иными словами, расстояние от берега до удаленной мористой зоны должно быть более 4–5 градусов. На рис. 1 (слева) видно, что выбранная нами мористая зона расположена на расстоянии 7 градусов от берега. При этом сама эта мористая зона имеет ширину 3.5 градуса (что в 2 раза больше ширины апвеллинговой зоны). Как показано в работе (Серебренников, 2018), для рассматриваемых апвеллингов этого достаточно для оптимального расчета ТИА.

*Методики расчета сезонной изменчивости характеристик апвеллинга с использованием минимальных значений ТИА*

Для каждого месяца каждого года ежесуточные величины ТИА, рассчитанные во всех точках, входящих в рассматриваемую область в окрестности каждого из апвеллингов (Калифорнийского, Перуанского, Чилийского, Канарского и Бенгельского), сортируются в возрастающем порядке. Для “*n*” отсортированных таким образом точек вычисляются медианные значения ТИА:

$$Me_{m,y} = T_{j,m,y},$$

где  $T_{j,m,y}$  – медианное значение ТИА в точке  $j$  за месяц  $m$  и год  $y$ ;  $j = (n + 1)/2$ ,  $n$  – количество точек (нечетное) в области апвеллинга, взятых с начала отсортированного в порядке возрастания величины ТИА ряда. Таким образом, ряды  $Me_{m,y}$  содержат медианные значения “ $n$ ” минимальных величин ТИА за все годы и все месяцы. Минимальные климатические значения ТИА по каждому месяцу получаются путем простого осреднения, а именно:

$$\widetilde{T}_m = \frac{1}{K} \sum_{y=1}^K Me_{m,y},$$

где  $K$  – длина ряда в годах,  $\widetilde{T}_m$  – климатические минимальные месячные значения.

Величина “ $n$ ” была выбрана из следующих соображений. Для всех исследуемых апвеллингов были рассчитаны сезонные циклы ТИА при разных значениях “ $n$ ”. Изменение величины “ $n$ ” от

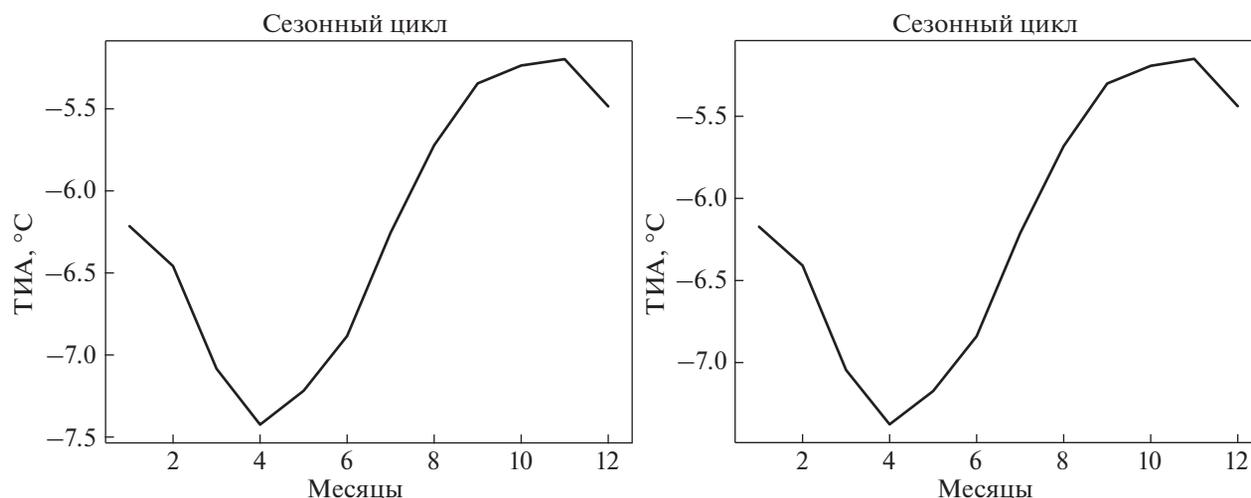


Рис. 2. Сезонный цикл минимальных значений ТИА для Бенгельского апвеллинга при  $n = 11$  (слева) и  $n = 41$  (справа).

11 до 41 в очень незначительной степени влияет на характеристики сезонного цикла ТИА, и этими изменениями можно пренебречь (рис. 2). В итоге было выбрано  $n = 21$ . Нечетное число взято для более простого вычисления медианы. Отметим, что слишком малое число “ $n$ ” уменьшает статистическую достоверность результатов расчетов, а слишком большое приводит к искажению параметров сезонной изменчивости интенсивности апвеллинга из-за увеличения роли аномалий ТПО в прибрежной зоне, обусловленных влиянием процессов, не связанных напрямую с подъемом вод (например, горизонтальной адвекцией). Важно подчеркнуть, что в указанном диапазоне значений “ $n$ ” результаты расчетов мало чувствительны к изменению “ $n$ ”.

*Методика расчета долговременного тренда интенсивности апвеллинга с использованием минимальных значений ТИА*

Средние минимальные значения ТИА в области каждого апвеллинга для каждого года и каждого месяца вычисляются по “ $n$ ” минимальным значениям:

$$\widetilde{T}_{m,y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{i,m,y},$$

где  $n$  – количество точек в области апвеллинга, взятых с начала отсортированного в порядке возрастания величины ТИА ряда;  $T_{i,m,y}$  – среднемесячное минимальное значение ТИА в точке  $i$  за месяц  $m$  и год  $y$ .

Таким образом, получены ряды минимальных среднемесячных величин ТИА для каждого года, которые затем обрабатывались по следующему алгоритму. Для каждого месяца рассчитывались

линейные тренды и полиномиальные аппроксимации 3-й степени (т.е. используется кубический полином), по которым вычислялись коэффициент детерминации ( $R^2$ ) и дисперсионный параметр, показывающий расхождение между линейной и кубической аппроксимациями, названный коэффициентом достоверности ( $CF$ , см. ниже). Изменяя “ $n$ ” от 10 до 100, выбираем месяцы с максимальными  $R^2$  и  $CF$ . К первоначально выбранному одному месяцу с максимальными  $R^2$  и  $CF$  добавляется следующий месяц, при условии, что коэффициенты  $R^2$  и  $CF$  для осредненного по двум месяцам ряда не уменьшаются. Следующие месяцы добавляются аналогично. Таким образом, мы включаем в расчет только те месяцы, которые не уменьшают  $R^2$  и  $CF$ . Как правило, не участвуют в расчете месяцы с большой дисперсией ТИА. При полученном значении “ $n$ ” рассчитываем среднее значение минимального ТИА для каждого года из выбранных месяцев:

$$\widetilde{T}_y = \frac{1}{p} \sum_{m=1}^p \widetilde{T}_{m,y},$$

где  $p$  – количество обрабатываемых месяцев,  $\widetilde{T}_y$  – среднее минимальное значение ТИА, вычисленное как среднее арифметическое минимальных значений ТИА за выбранные месяцы для каждого года.

За величину отклонения линейного тренда от кубической аппроксимации ряда принят безразмерный коэффициент достоверности  $CF$  (confidence factor), основанный на расчете дисперсии кубической аппроксимации относительно линии тренда.

$$CF = 1 - \frac{100}{K} \sum_{i=1}^K s_i^2,$$

где  $s_i = (x_i - x_3) / (\max - \min)$ ,  $x_i$  – значения линейного тренда,  $x_3$  – значения кубической аппроксимации,  $k$  – длина ряда средних значений ТИА (индекс  $i = 1 \dots k$ ),  $\max$ ,  $\min$  – максимальное и минимальное значения средних величин ТИА, 100 – масштабный коэффициент.

Если  $CF < 0$ , то  $CF = 0$ , т.е.  $CF$ , не может быть отрицательным.

Наряду с коэффициентом детерминации ( $R^2$ ), коэффициент достоверности ( $CF$ ) характеризует значимость линейного тренда ряда.  $CF$  изменяется от 0 до 1, где 0 присваивается линейному тренду, плохо описывающему долговременные тенденции изменений ТИА, а 1 – линейному тренду, хорошо аппроксимирующему эти тенденции. Тренд может характеризоваться достаточно большой величиной  $R^2$ , но если кубическая аппроксимация экспериментальных точек сильно отличается от линейного тренда, то коэффициент достоверности будет близок к нулю, и линейный тренд является неподходящей интерполяционной функцией. Многочисленные расчеты показали, что величины  $R^2$  и  $CF \geq 0.5$  и  $\geq 0.7$  соответственно характеризуют приемлемую значимость линейного тренда и его пригодность для описания долговременных тенденций изменений ТИА. В этом случае линейный тренд отвечает как минимум за половину суммарной дисперсии, обусловленной межгодовой–междесятилетней изменчивостью ТИА, а использование кубического полинома не увеличивает принципиально долю дисперсии, описываемую этим аппроксимационным полиномом по сравнению с линейной функцией.

По минимальным значениям ТИА ( $\widetilde{T}_y$ ) для каждого апвеллинга построены линейная, кубическая и квантильная регрессии. При построении линейной и кубической аппроксимации применялся метод наименьших квадратов. Он позволяет получить хорошие статистические результаты в предположении, что случайные ошибки распределены по нормальному (гауссовскому) закону. На практике это условие не всегда выполняется. В построенных графиках межгодовых изменений ТИА часто присутствуют аномалии большой амплитуды и линейная регрессия может давать неправильную тенденцию. Более устойчивым к выбросам в данных является метод квантильной регрессии. Этот метод является непараметрическим, т.е. распределение исследуемой величины не принадлежит какому-либо параметрическому семейству и относится к робастным методам. Другими словами, он устойчив к выбросам. Метод квантильной регрессии был впервые предложен в 1978 г. (Koenker, Bassett, 1978), но из-за громоздких вычислений стал популярным только в XXI в. Этот метод детально изложен во многих работах (Koenker, Hallock, 2001; Koenker, 2005; Cade, Noon, 2003) и представлен в нескольких математических библиотеках

для различных языков программирования. В настоящей работе для определения квантильной регрессии использовалась библиотека для языка Python (Seabold et al., 2010). Она хорошо показала себя при анализе тенденций интенсивности апвеллингов, проведенном в работе (Полонский, Серебренников, 2020).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

### *Сезонный цикл ТИА*

Первый результат, на который необходимо обратить внимание, заключается в том, что максимальное проявление апвеллинга в ТПО, оцененное по минимальным значениям ТИА, сдвинуто примерно на один месяц вперед относительно максимального его проявления в ТИА, осредненного по площади в переменных во времени климатических масках. Этот результат иллюстрируется рис. 3 и 4. На левых из них показан сезонный цикл ТИА, вычисленный в климатических масках для Перуанского и Канарского апвеллингов, изменяющихся от одного месяца к другому (Серебренников, 2018; Polonsky, Serebrennikov, 2019). На тех же рисунках справа показан сезонный цикл ТИА для этих же апвеллингов, вычисленный по минимальным значениям индекса в фиксированных масках по приведенному выше алгоритму. Согласно рис. 3, максимальное проявление Перуанского апвеллинга в поле ТИА, вычисленного в переменных климатических масках, пришлось на апрель, а вычисленного для минимальных значений ТИА – на апрель–май. Максимальное проявление апвеллинга в ТИА для Канарской системы, согласно левому рис. 4, пришлось на сентябрь–ноябрь, а согласно правому рис. 4 – на ноябрь. Некоторое “запаздывание” минимальных значений ТИА относительно средних значений, вычисленных в меняющихся во времени климатических масках, наблюдается практически во всех апвеллингах (см. табл. 1). Этот результат объясняется разными методами расчета ТИА в этих двух случаях. В меняющейся во времени маске, ограниченной от окружающих вод определенным температурным градиентом, вычисляется среднее по площади маски значение ТИА. При усилении апвеллинга, проявляющемся в увеличении (по абсолютной величине) минимальных величин ТИА, происходит расширение площади маски. При этом на осредненные по всей площади маски величины ТИА могут влиять процессы, не связанные непосредственно с апвеллингом (горизонтальная адвекция, например). В результате осредненное абсолютное значение ТИА может даже уменьшиться. Вместе с тем, при расчете ТИА по “ $n$ ” минимальным значениям ТПО в фиксированных масках вычисленное медианное значение ТИА не зависит от площади масок, что приводит к более достоверному

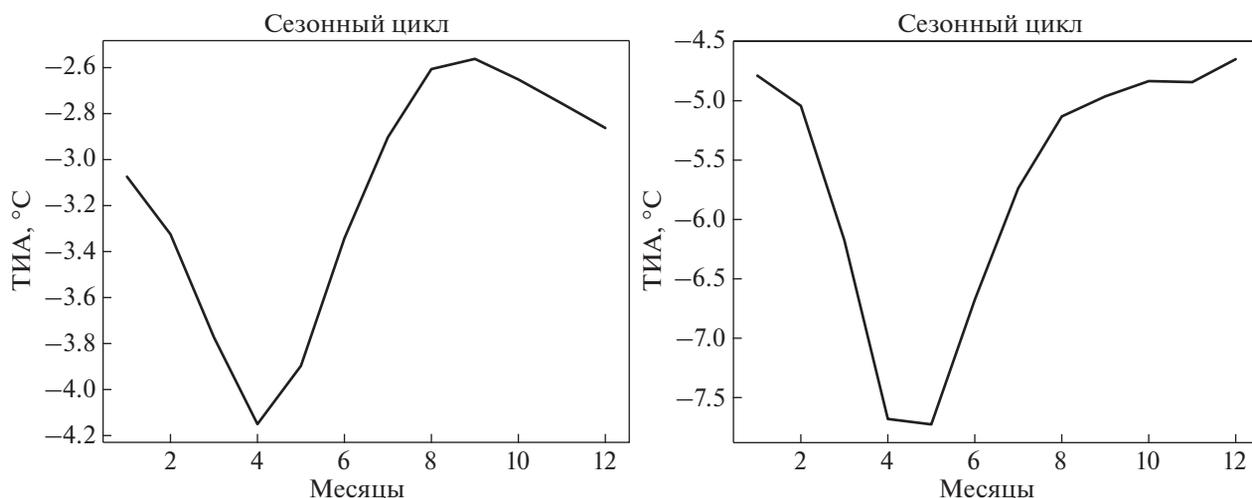


Рис. 3. Сезонный цикл усредненных по климатическим маскам значений ТИА (слева) и медианных значений "n" минимальных ТИА (справа) для Перуанского апвеллинга.

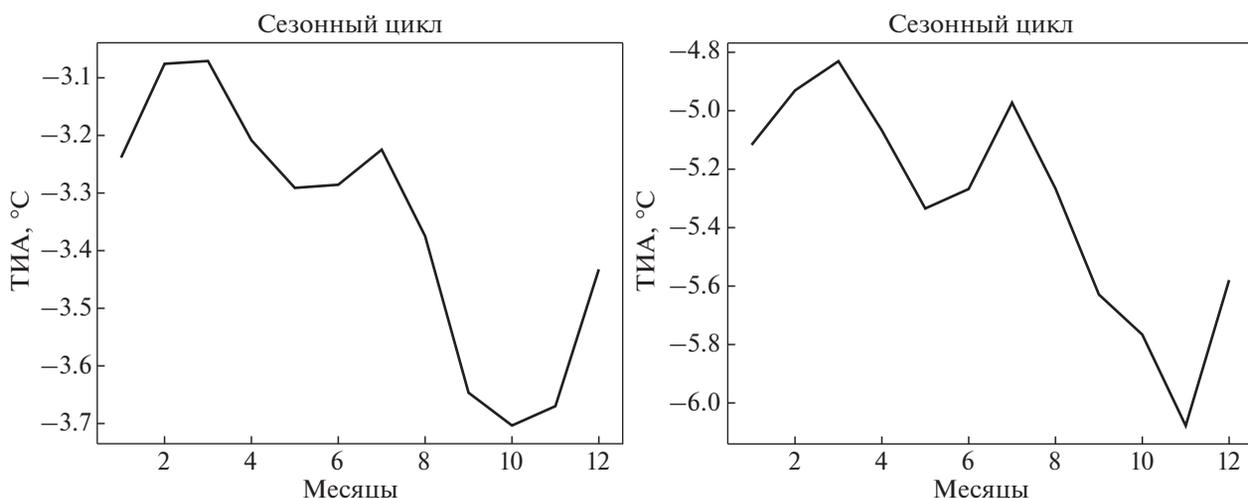


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для Канарского апвеллинга.

расчету сезонного цикла интенсивности апвеллинга. В результате получают фазовые различия между временем достижения максимума апвеллинга, вычисленного по осредненным значениям ТИА в переменных климатических масках, и полученными из ограниченного набора минимальных величин ТИА в фиксированной маске.

Второй результат подчеркивает существенно разный характер сезонного цикла ТИА в различных апвеллинговых зонах. Так, например, в Перуанском апвеллинге максимальное его развитие по данным о ТИА отмечается на протяжении 2 мес (апрель—май, правый рис. 3), а для Канарского — в течение одного (ноябрь, правый рис. 4) При этом в Перуанском апвеллинге наблюдается ярко выраженная изменчивость ТИА с периодом в 1 год,

а в Канарском — существенную роль в сезонной изменчивости ТИА играют более высокочастотные периодические компоненты, в частности гармоника с периодом около полугода. Причина этого различия заключается в разном характере сезонной изменчивости полей ветра в окрестности этих апвеллинговых зон и генерируемых ими вертикальных движений. Действительно, сезонная изменчивость вертикальных скоростей в Перуанском и Канарском апвеллингах, обусловленных сгонным эффектом вдольбереговых ветров и завихренностью полей ветра, существенно различается между собой. В первом из них вертикальные движения ветрового происхождения характеризуются ярко выраженной годичной периодичностью, в то время как в области Канарского апвеллинга важную

**Таблица 1.** Номера месяцев с максимальным проявлением апвеллинга в ТИА, вычисленном в переменных по времени климатических масках (А1) и по “*n*” минимальным значениям ТИА в фиксированных масках (А2), параметры линейных трендов, осредненных по климатическим маскам ТИА и по минимальным значениям ТИА, для каждого из рассматриваемых океанических апвеллингов

Анализируемые апвеллинги в Атлантике и Тихом океане	Сезонный цикл. Номера месяцев с максимальным проявлением апвеллинга в ТИА		Характеристика линейных трендов ТИА, усредненных по климатическим маскам			Характеристика линейных трендов минимальных значений ТИА		
	A1	A2	$R^2$	Inc, °C	Proc, %	$R^2$	Inc, °C	Proc, %
Канарский	10	11	0.26	-0.3	4.6	0.51	-1.6	10.8
Бенгельский	3–4	4	0.09	-0.2	2.3	0.28	-0.8	6.3
Калифорнийский	8–9	8–9	0.01	0.1	-1.5	0.23	-1.2	8.4
Перуанский	4	4–5	0.01	-0.1	1.8	0.20	-1.3	9.0
Чилийский	2–3	3	0.13	-0.5	7.1	0.28	-0.7	9.7

Примечание.  $R^2$  – коэффициент детерминации линейных трендов; Inc – общее приращение каждого параметра за весь анализируемый период, связанное с линейным трендом, Proc – приращение каждого параметра за весь анализируемый период, связанное с линейным трендом, относительно среднего значения (в %).

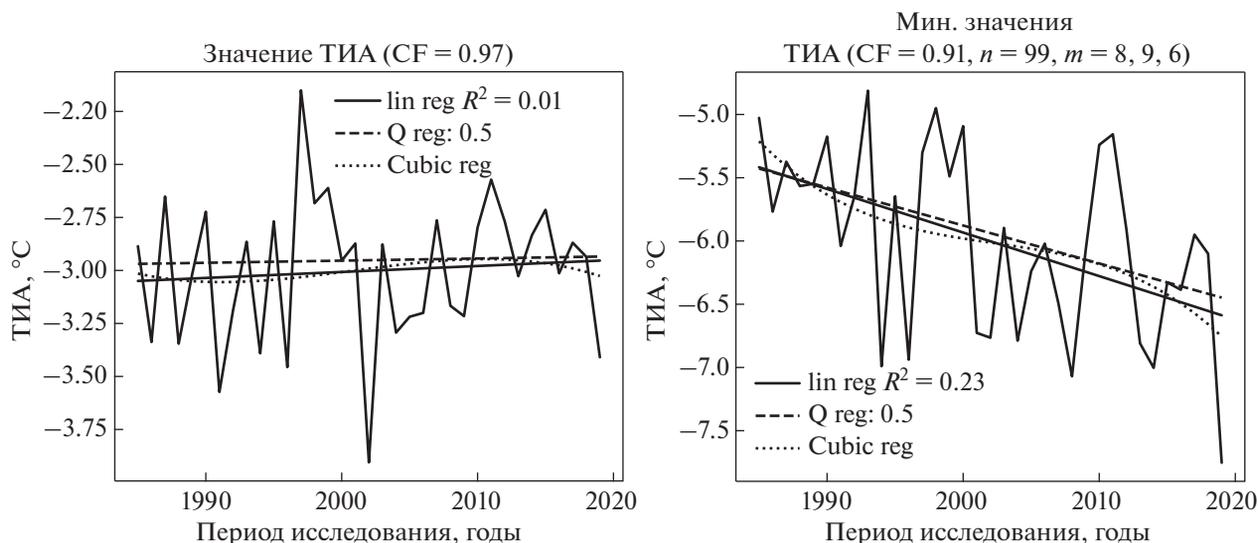
роль играют и более высокочастотные периодические компоненты. Это и приводит к более гладкому характеру временного хода ТИА в Перуанском апвеллинге по сравнению с Канарским. Это хорошо видно по графикам сезонного цикла вертикальной скорости для Перуанского и Канарского апвеллингов, построенным по данным о поле ветра за 35-летний период по методике, подробно описанной в работах (Polonsky, Serebrennikov, 2019; Полонский, Серебренников, 2020). Рисунок, иллюстрирующий этот результат, не приведен, поскольку типичный сезонный цикл интенсивности анализируемых апвеллингов представлен в этих работах.

#### *Межгодовая изменчивость и тренды ТИА*

Предложенный алгоритм дает возможность более четко выделять параметры межгодовой изменчивости и долговременные тренды ТИА, обусловленные вариациями интенсивности апвеллинга ветрового происхождения. На рис. 5, для примера, показана межгодовая изменчивость средних значений ТИА (слева) и минимальных значений ТИА (справа) для Калифорнийского апвеллинга. Для левого рисунка вычисления производились в климатических масках путем усреднения всех значений, попавших в маску, согласно алгоритму из работ (Серебренников, 2018; Полонский, Серебренников, 2019), а для правого – в фиксированной маске по алгоритму, приведенному в настоящей работе. Хорошо видно, что имеет место значимая тенденция усиления Калифорнийского апвеллинга, выделенного по минимальным значениям ТИА. Причем эта тенденция относительно неплохо описывается линейным трендом (его коэффициент детерминации  $R^2 = 0.23$ ). Вместе с тем, временной ход осредненных значений ТИА, вычисленных в кли-

матических масках, не показывает наличие значимых однонаправленных тенденций – коэффициент детерминации линейного тренда близок к нулю (точнее,  $R^2 = 0.01$ ). Аналогичная закономерность подтверждается и графиками, представленными на рис. 6 и построенными по данным о ТПО для области Перуанского апвеллинга. Таблица 1 указывает на тот факт, что и для остальных апвеллингов ВПАС линейные тренды ТИА, рассчитанные по минимальным значениям ТИА, характеризуются намного большими коэффициентами детерминации, чем тренды, оцененные по усредненным (в пределах климатических масок) величинам ТИА.

Минимальный коэффициент детерминации линейного тренда (0.20) отмечается в области Перуанского апвеллинга (табл. 1). Это вполне естественно, поскольку именно здесь наблюдается наиболее интенсивная межгодовая изменчивость ТИА, обусловленная событиями Эль-Ниньо и Ла-Ниньо. Эти события очень хорошо проявляются на временном ходе термических характеристик, представленных на рис. 6. Из этого рисунка также видно большее расхождение между линейной и квантильной регрессиями в области Перуанского апвеллинга по сравнению с Калифорнийским (сравните рис. 6 и 5), что говорит о значительном отклонении вероятностного распределения ТИА в первом из них от нормального. Вообще полученные в настоящей работе результаты подтверждают сделанный нами ранее вывод (Полонский, Серебренников, 2020) о том, что в целом Атлантические апвеллинги демонстрируют более явно выраженную долговременную интенсификацию восходящих движений в пределах ВПАС, чем Тихоокеанские.



**Рис. 5.** Межгодовая изменчивость, линейный тренд (сплошная линия), квантильная медианная регрессия (штриховая линия) и кубическая аппроксимация (пунктирная кривая) осредненных по переменной площади масок значений ТИА (слева) и минимальных значений ТИА (справа) для Калифорнийского апвеллинга.

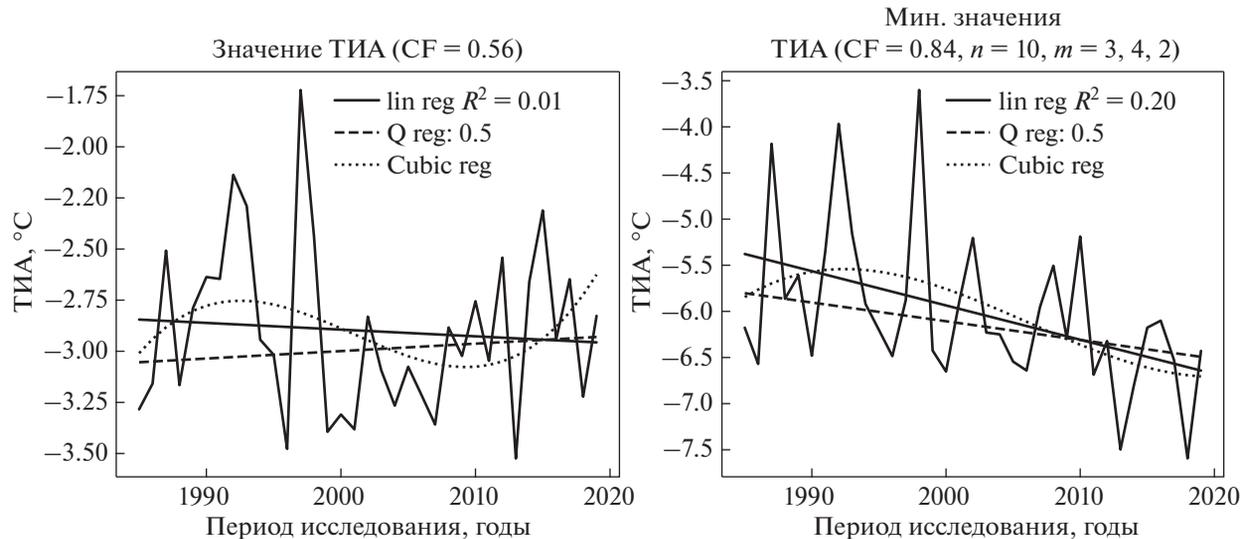
“Ln Reg  $R^2 = 0.01$ ” – линейная регрессия с коэффициентом детерминации равным 0.01;

“Q Reg: 0.5” – квантильная регрессия с квантилем распределения  $\tau = 0.5$  (медиана);

“Cubic Reg” – кубическая аппроксимация;

“ $n = 99$ ” – количество точек в области апвеллинга с минимальными значениями ТИА, взятые с начала отсортированного ряда;

“ $m = 8, 9, 6$ ” – номера обрабатываемых месяцев (август, сентябрь, июнь) в порядке уменьшения коэффициента детерминации (значения “ $n$ ” и “ $m$ ” выбираются автоматически в соответствии с алгоритмом, описанным выше)



**Рис. 6.** То же, что и на рис. 5, но для Перуанского апвеллинга.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модифицированная методика оценки интенсивности сезонной и межгодовой изменчивости апвеллингов, основанная на расчете минимальных значений ТИА, базируется на следующих (физически непротиворечивых) предположениях. Из-

менчивость наименьших значений ТИА отражает эволюцию подповерхностных вод, поднимающихся на поверхность за счет сгонного эффекта касательного напряжения и циклонической завихренности приповерхностного ветра. Выносимые на поверхность холодные воды активно перемешиваются с окружающей поверхностной

водной массой, но при этом всегда можно выделить участки с минимальными значениями ТИА, которые приурочены именно к зоне апвеллинга, достигающего ВПС. Сезонная изменчивость интенсивности апвеллинга рассчитывалась по фиксированному числу минимальных значений ТИА. Это позволило выделить сезонные вариации ТИА, лучше согласующиеся с внутригодовой изменчивостью восходящих движений ветрового происхождения, чем изменения усредненных (по климатическим маскам с переменной площадью) значений ТИА.

При расчете межгодовой изменчивости число минимальных значений ТИА и месяцы, в которых производился расчет, подбирались алгоритмически по критерию нахождения максимально значимого линейного тренда. Иными словами, месяцы с большой дисперсией ТИА из расчета удалялись. Эта методика стала результатом развития идеи, изложенной в работе (Полонский, Серебренников, 2020), в которой линейные тренды межгодовой изменчивости для апвеллингов ВПАС также рассчитывались по минимальным значениям ТИА. По результатам расчета долговременных трендов ТИА с использованием модифицированной методики подтвержден вывод о долговременной интенсификации всех апвеллингов ВПАС за период ~35 лет, что не противоречит известной гипотезе Бакуна об усилении крупномасштабных прибрежных океанических апвеллингов в процессе глобального потепления, опубликованной в работе (Bakun, 1990).

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность анонимному рецензенту за доброжелательный отзыв и конструктивные замечания.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы госзадания № 0012-2019-0002 (“Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гилл А. Динамика атмосферы и океана: пер. с англ. В 2 т. М.: Мир. 1986. 815 с.
- 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. Интенсификация восточных пограничных апвеллинговых систем в Атлантическом и Тихом океанах // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 86–95.
- Серебренников А.Н. Улучшенная методика определения индексов прибрежных апвеллингов по спутниковым данным // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 44–51.
- 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>
- Belmadani A., Echevin V., Codron F., Takahashi K., Junquas C. What dynamics drive future wind scenarios for coastal upwelling off Peru and Chile? // Climate Dynamics. 2014. V. 43. № 7–8. P. 1893–1914.
- Cade B., Noon B. A Gentle Introduction to Quantile Regression for Ecologists // Frontiers in Ecology and the Environment. 2003. V. 1. P. 412–420. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0412:AGITQR\]](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0412:AGITQR])
- 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.
- Carr M.E., Kearns E.J. Production regimes in four Eastern Boundary Current systems // Deep Sea Res., Part II. 2003. V. 50. № 22–26. P. 3199–3221.
- 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(3). 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)
- 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>
- Huyer A. Coastal upwelling in the California Current System // Prog. Oceanogr. 1983. 12. P. 259–284. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(83\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0079-6611(83)90010-1)
- 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.
- Koenker R., Bassett G. Jr. Regression Quantiles // Econometrica. 1978. V. 46. № 1. P. 33–50.
- Koenker R., Hallock K. Quantile Regression // J. Economic Perspectives. 2001. V. 15. P. 143–156.
- Koenker R. Quantile regression. N.Y.: Cambridge University Press, 2005. 368 p.
- Pauly D., Christensen V. Primary production required to sustain global fisheries // Nature. 1995. V. 374. P. 255–257. <https://doi.org/10.1038/374255a0>
- Philander S. George. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation // San Diego: Academic Press, 1990. Interna-

tional Geophysics Series, V. 46. P. 293.

<https://doi.org/10.1126/science.248.4957.904>

*Polonsky A.B., Serebrennikov A.N.* On the Change in the Ocean Surface Temperature in the Benguela Upwelling Region. Part I: Season Cycle. // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 1050–1059.

<https://doi.org/10.1134/S0001433819090391>

*Seabold S., Perktold J.* Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python // Proceedings of the 9th Python in Science Conference. 2010. URL: <http://conference.scipy.org/proceedings/scipy2010/pdfs/seabold.pdf>.

Upwelling: Mechanisms, ecological effects and threats to biodiversity USA, N.Y.: Nova Sci. Publ. Inc. W.E. Fischer, A.B. Green (eds.). 2013. P. 59–76.

## Modified Technique for Calculating the Parameters of Climatic Variability of Upwelling by Thermal Index

A. B. Polonsky<sup>a</sup> and A. N. Serebrennikov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia*

The article discusses an improved method for calculating the amplitude-phase characteristics of the seasonal cycle and long-term trends in upwelling intensity, based on the analysis of the minimum (maximum in absolute value) values of the thermal upwelling index (TUI). TUI is calculated as the difference in satellite ocean surface temperature between the coastal and offshore zones in areas of large-scale oceanic upwellings. Using the proposed methodology, the parameters of climatic variability were calculated for the Eastern Boundary Upwelling Systems (EBUS). Seasonal variations of the TUI calculated in this way are in better agreement with the intra-annual variability of the upward motions of the wind origin than changes in the TUI values averaged in the climate masks. The long-term TUI trends obtained by the modified method are more significant than those calculated in climatic masks and confirm the upwellings' intensification in the last ~35 years.

**Keywords:** upwelling, ocean surface temperature, thermal upwelling index, seasonal cycle, interannual variability, long-term trends

### REFERENCES

*Gill A.* Dinamika atmosfery i okeana [Atmosphere–Ocean Dynamics]: per. s angl. V. 2 t. Moscow: Mir. 1986. 815 p. (In Russian).

*Polonskiy 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] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2019. № 4. P. 29–39 (In Russian). DOI: 10.31857/S0205-96142019429-39

*Polonskiy A.B., Serebrennikov A.N.* Intensifikatsiya vostochnykh pogranychnykh apvellingovykh sistem v Atlanticheskom i Tihom okeanah [Intensification of Eastern Boundary Upwelling Systems in the Atlantic and Pacific Oceans] // *Meteorologiya i gidrologiya.* 2020. № 5. P. 86–95 (In Russian).

*Serebrennikov A.N.* Uluchshennaya metodika opredeleniya indeksov pribrezhnykh apvellingov po sputnikovym dannym [An improved technique for the retrieval of coastal upwelling indices from satellite data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2018. T. 15. № 5. P. 44–51 (In Russian).

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

*Bakun A., Black B.A., Bograd S.J., Garcia-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. DOI: 10.1007/s40641-015-0008-4

*Belmadani A., Echevin V., Codron F., Takahashi K., Junquas C.* What dynamics drive future wind scenarios for coastal up-

welling off Peru and Chile? // *Climate Dynamics.* 2014. V. 43. № 7–8. P. 1893–1914.

*Cade B., Noon B.* A Gentle Introduction to Quantile Regression for Ecologists // *Frontiers in Ecology and the Environment.* 2003. V. 1. P. 412–420. DOI: 10.1890/1540-9295(2003)001[0412:AGITQR] 2.0.CO;2

*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.

*Carr M.E., Kearns E.J.* Production regimes in four Eastern Boundary Current systems // *Deep Sea Res., Part II.* 2003. V. 50. № 22–26. P. 3199–3221.

*Chavez F.P., Messie M.* A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems // *Prog. Oceanogr.* 2009. V. 83. № 1–4. P. 80–96. DOI: 10.1016/j.pocan.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(3). P. 433–460. DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<0433:GVOTFB>2.0.CO;2

*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. DOI: 10.3389/fmars.2015.00109

*Huyer A.* Coastal upwelling in the California Current System // *Prog. Oceanogr.* 1983, 12. P. 259–284. DOI: 10.1016/0079-6611(83)90010-1

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 Cli-

- mate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.
- Koenker R., Bassett G. Jr.* Regression Quantiles // *Econometrica*. 1978. V. 46. № 1. P. 33–50.
- Koenker R., Hallock K.* Quantile Regression // *J. Economic Perspectives*. 2001. V. 15. P. 143–156.
- Koenker R.* Quantile regression. N.Y.: Cambridge University Press, 2005. 368 p.
- Pauly D., Christensen V.* Primary production required to sustain global fisheries // *Nature*. 1995. V. 374. P. 255–257. DOI: 10.1038/374255a0
- Philander S. George.* El Niño, La Niña and the Southern Oscillation // San Diego: Academic Press, 1990. P. 293, International Geophysics Series. V. 46. DOI: 10.1126/science.248.4957.904
- Polonsky A.B., Serebrennikov A.N.* On the Change in the Ocean Surface Temperature in the Benguela Upwelling Region. Part I: Season Cycle. // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 1050–1059. DOI: 10.1134/S0001433819090391
- Seabold S., Perktold J.* Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python // *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. 2010. URL: <http://conference.scipy.org/proceedings/scipy2010/pdfs/seabold.pdf>.
- Upwelling: Mechanisms, ecological effects and threats to biodiversity USA, N.Y.: Nova Sci. Publ. Inc. W.E. Fischer, A.B. Green (eds.). 2013. P. 59–76.