

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА В ЗОНЕ БЕНГЕЛЬСКОГО АПВЕЛЛИНГА. ЧАСТЬ 2: МНОГОЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ

© 2019 г. А. Б. Полонский^{1,2,3,*}, А. Н. Серебренников¹

¹Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

²Филиал МГУ в г. Севастополе, Севастополь, Россия

³Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*E-mail: apolonsky5@mail.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

В работе исследуется вопрос о многолетних тенденциях в изменении температуры поверхности океана в зоне Бенгельского апвеллинга и их причинах на основе ежедневной спутниковой информации о температуре поверхности океана за 1985–2017 гг. и приповерхностном ветре за 1988–2017 гг. Показано, что в области Бенгельского апвеллинга в последние 20 лет наблюдается значимое усиление сгонных ветров. Это сопровождается уменьшением термического индекса апвеллинга (с учетом знака индекса или увеличением его абсолютных значений) в южной части Бенгельского апвеллинга, но практически не влияет на этот показатель в северной его части. Вероятная причина отмеченного различия заключается в изменении структуры поля ветра, вследствие которого отмечаются противоположные по знаку тренды в величине завихренности касательного напряжения трения ветра в различных частях Бенгельского апвеллинга. В южной части Бенгельского апвеллинга и сгонный апвеллинг, и вертикальные скорости, обусловленные завихренностью приводного ветра, интенсифицируются, а в северной его части соответствующие тренды имеют противоположные знаки. Это приводит к частичной компенсации этих двух эффектов в северной части Бенгельского апвеллинга. Причиной изменения структуры поля ветра является смещение центра Субтропического максимума давления на юго-восток и сопутствующий разворот векторов приповерхностного ветра в прибрежной зоне.

Ключевые слова: апвеллинг, температура поверхности океана, приповерхностный ветер, термический индекс апвеллинга, экмановский перенос, экмановская накачка, климатические тренды температуры

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019429-39>

ВВЕДЕНИЕ

Апвеллинговые зоны, расположенные у западных берегов Африки (Бенгельский и Канарский регионы), наряду с Калифорнийским и Перуанским апвеллингами представляют собой одни из самых продуктивных океанических экосистем в мире (Carr, 2002; Carr and Kearns, 2003; Chavez and Messie, 2009). Они поддерживают обширные и разнообразные морские популяции. На них приходится около 20% мирового рыболовства.

По сравнению с другими крупномасштабными зонами подъема вод Бенгельская апвеллинговая система, которая располагается вдоль юго-западного побережья Африки между 34° ю.ш. и 15° ю.ш., обладает рядом уникальных характеристик. Бенгельский апвеллинг (БА) ограничен как с севера, так и с юга двумя теплыми течениями — Ангольским и Агульским, соответственно, которые могут оказывать большое влияние на характеристики апвеллинга (Backeberg et al., 2012). Сезонная изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) в северной и южной частях БА существенно

различается. Граница раздела между этими районами расположена в окрестности 28° ю.ш. Это вызвано различием в региональном ветровом режиме, определяющем скорость подъема холодных промежуточных и глубинных вод к фотическому поверхностному слою (Полонский, Серебренников, 2019).

Прибрежный апвеллинг (Strub et al., 1998) вызван доминирующим поверхностным ветровым напряжением, приводящим к сгону теплых поверхностных вод. В то же время, определенную роль здесь играет и экмановская накачка, которая связана с положительной завихренностью в поле ветра, приводящей к подъему вод (Junker et al., 2015) (отметим, что в настоящей работе используется метеорологическая система координат с вертикальной осью, направленной вверх). Суммарная вертикальная скорость превышает в зоне БА 2.5×10^{-3} см/с (Полонский, Серебренников, 2019). Такие высокие значения вертикальных скоростей не только определяют особенности функционирования региональных экосистем, но и существенно влияют на характеристики взаимодействия

океана с атмосферой, а, следовательно, и климат из-за значительного понижения ТПО в зоне крупномасштабных океанических апвеллингов (IPCC, 2014). Вот почему знание многолетних тенденций в изменениях параметров апвеллинга важно не только для оценки перспектив рыболовства, но и для изучения глобальных и региональных климатических изменений.

Относительно долговременных тенденций изменения интенсивности крупномасштабных океанических апвеллингов автор работы (Bakun, 1990) выдвинул гипотезу, которую можно резюмировать следующим образом: вследствие разной теплоемкости верхнего слоя почвы и деятельного слоя океана при глобальном потеплении температура поверхности континентов растет быстрее, чем ТПО. Это приводит к увеличению градиента давления между сушей и морем. В результате этого, а также отклоняющего действия силы Кориолиса, усиливаются прибрежные сгонные ветры и апвеллинг должен интенсифицироваться. Наблюдения действительно указывают на тот факт, что в районе юго-западной Африки температура поверхности суши растет быстрее, чем ТПО.

Гипотеза Бакуна подтверждена в ряде публикаций. Так авторы работы (Nagayan et al., 2010) обнаружили тенденцию к снижению прибрежной ТПО в четырех основных апвеллинговых системах в 1960–2000 гг. Они связали эту тенденцию с усилением меридионального ветрового напряжения. Это мнение для района БА было поддержано автором работы (Demarg, 2009), который обнаружил положительную тенденцию в скорости меридиональных ветров в области БА в 2000–2007 гг. Вместе с тем, в ряде работ отмечается отсутствие значимых тенденций усиления крупномасштабных апвеллингов. Так, например, (Belmadani et al., 2014) не смогли идентифицировать механизмы, связывающие термический контраст суши и моря с благоприятными для подъема вод ветрами в области Перу-Чилийского апвеллинга. Авторы работы (Tim et al., 2015) провели моделирование долговременных тенденций БА примерно за последние 50 лет и показали несостоятельность выдвинутой Бакуном гипотезы. Сам Бакун с соавторами в более поздних работах (см., например, Bakun et al., 2010) также выразили некоторые сомнения относительно справедливости гипотезы об усилении БА в процессе глобального потепления.

Неопределенность в оценке тенденций в интенсивности крупномасштабных океанических апвеллингов связана с двумя основными причинами. Во-первых, для большинства регионов

отсутствуют качественные гидрометеорологические данные необходимого разрешения за достаточно продолжительный период для выделения значимых трендов, обусловленных глобальным потеплением. Фактически, регулярные данные о ТПО и поле ветра достаточно высокого пространственно-временного разрешения доступны для апвеллинговых регионов на основе спутниковой информации только с начала и второй половины 1980-х гг. соответственно (Hartmann et al., 2013; Полонский, Серебренников, 2017, 2018; Lamont et al., 2018). При наличии интенсивных межгодовых и междесятилетних изменений в системе океан–атмосфера (см., например, Dufois and Rouault, 2012) это приводит к невозможности разделения эффектов, связанных с глобальным потеплением антропогенного характера, и низкочастотных вариаций естественного происхождения. Во-вторых, проявления глобального потепления далеко не ограничиваются изменениями интенсивности вдольбереговых ветров. Одной из причин несостоятельности гипотезы о неизбежном усилении крупномасштабного апвеллинга у западных берегов материков при потеплении может служить ослабление зональной циркуляции, особенно выраженное в Северном полушарии. Это должно приводить к ослаблению горизонтальной адвекции холодных вод апвеллингового происхождения и уменьшать соответствующие тенденции изменений ТПО в районах, примыкающих к зонам крупномасштабных апвеллингов (Полонский, Серебренников, 2018).

Таким образом, возникает вопрос о направленности тенденций в интенсивности БА в процессе глобального потепления и их причинах. Выделение таких тенденций на значимом уровне с использованием спутниковой информации, а также обсуждение их возможных причин и является целью настоящей работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание источников данных и методов расчета параметров апвеллинга изложены в 1-й части работы (Полонский, Серебренников, 2019). Как и в этой работе, вся система БА разделена на две области с границей между ними на 28° ю.ш.: систему Южного Бенгельского апвеллинга (ЮБА, 36° – 28° ю.ш.) и систему Северного Бенгельского апвеллинга (СБА, 28° – 13° ю.ш.).

Все расчеты производились с ежесуточными данными по ТПО за 1985–2017 гг. с пространственным разрешением около 0.05° по широте и долготе. Для остальных ежесуточных данных

пространственное разрешение составляет 0.25° по широте и долготе. Приповерхностный ветер доступен с 1988 г., аномалии урвенной поверхности — с 1993 г.

Как правило, расчеты параметров апвеллинга проводились в среднемесячных климатических масках (Серебренников, 2018). Температурный параметр, ограничивающий мористую часть апвеллинговой области, и представляющий собой минимальную разность ТПО в прибрежной и удаленной океанической зонах (TLconst), имеет такое же значение, как и в 1-й части работы (2.6°C). Анализ влияния изменения величины этого параметра на результаты показал, что при увеличении его до 3.0°C или уменьшении до 2.0°C принципиальных количественных изменений не происходит. При этом все выводы на качественном уровне остаются в силе (Полонский Серебренников, 2019). Осреднение данных в маске проводилось простым среднеарифметическим способом. В качестве основного параметра, характеризующего интенсивность апвеллинга, использовался термический индекс апвеллинга (ТИА), рассчитанный по разнице ТПО в зоне апвеллинга и в удаленной зоне, расположенной за пределами зоны апвеллинга (ограниченной среднемесячной климатической маской).

Для определения тенденции ТПО в зоне БА рассчитывались межгодовые изменения ТИА

внутри климатических масок. Чтобы убедиться, что все существенные межгодовые изменения температуры происходят в пределах среднемесячных масок, были рассчитаны межгодовые дисперсии температуры для каждого месяца. На рис. 1 для иллюстрации полученного результата показаны дисперсии ТПО и ТИА, рассчитанные внутри климатических масок для одного выбранного месяца. Хорошо видно, что максимальные межгодовые колебания температуры происходят внутри маски. Таким образом, можно сделать вывод, что среднемесячные маски можно использовать для определения тенденции межгодовых изменений ТПО, как для ЮБА, так и для СБА.

Расчет минимальной температуры индекса апвеллинга проводился следующим образом. Для каждой точки в области апвеллинга (i) рассчитывалась средняя за 12 месяцев величина ТИА, которая, в свою очередь, вычислялась из среднемесячной температуры:

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

где n — число месяцев, равное 12, $T_{i,m}$ — среднемесячная температура в точке i за месяц m .

Затем из ряда $\tilde{T}_{y,i}$ выбиралась минимальная температура за обрабатываемый год: $\tilde{T}_y = \min(\tilde{T}_{y,i})$.

Площадь апвеллинговой области рассчитывалась по следующей формуле:

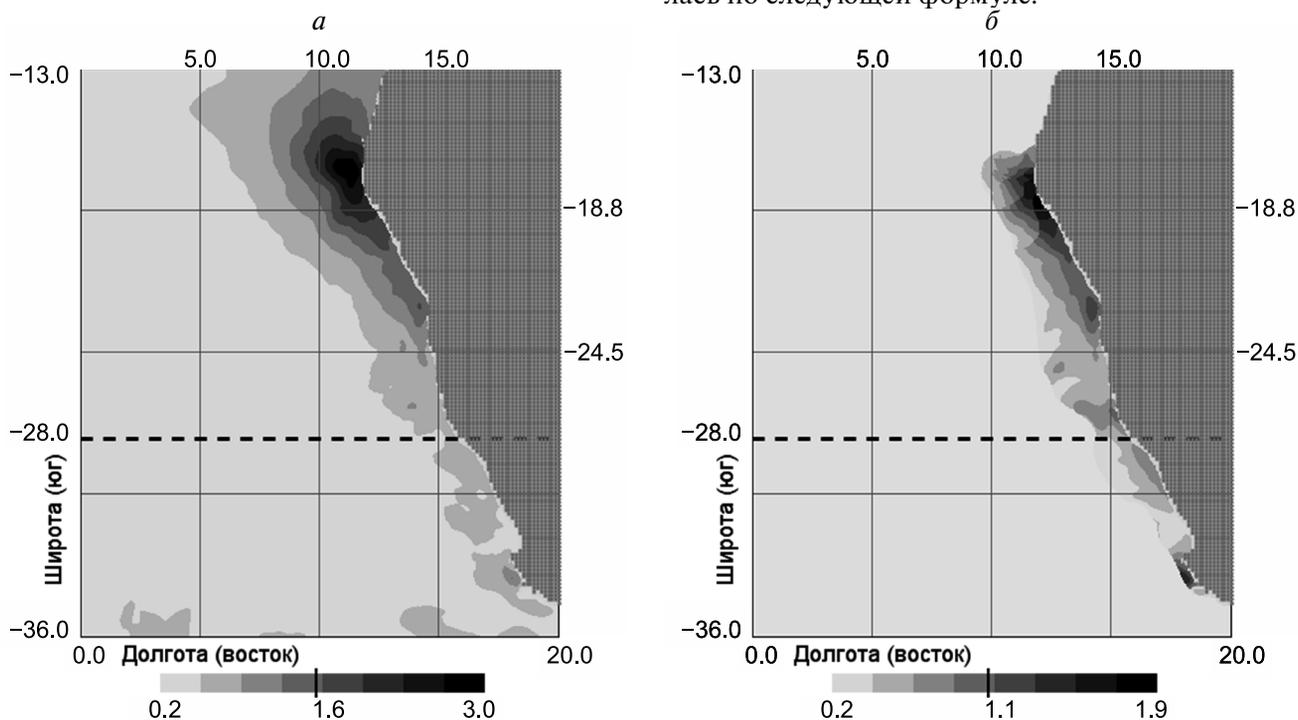


Рис. 1. Межгодовые дисперсии, рассчитанные в зоне Бенгельского апвеллинга для ТПО ($^\circ\text{C}^2$) (а) и для ТИА ($^\circ\text{C}^2$) (б) в области ограниченной максимальной среднемесячной маской. Все расчеты выполнены за март.

$S = n \times R$, где n — кол-во точек с отрицательными значениями ТИА в области климатической маски, R — площадь одной сферической трапеции в км^2 , зависящая от пространственного разрешения космического снимка и географической широты.

Далее по каждому анализируемому параметру рассчитывались тренды для двух апвеллинговых систем — ЮБА и СБА, определялась значимость трендов для 95% уровня и коэффициент детерминации тренда (R^2), указывающий на его вклад в суммарную изменчивость анализируемого параметра до удаления тренда.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результат оценки линейного тренда для величины ТИА в ЮБА указывает на значимое уменьшение величины ТИА (рис. 2). Поскольку ТПО в климатических масках изменяется не только за счет вариаций интенсивности апвеллинга, но и из-за изменения величины адвективных переносов тепла (Полонский, Серебренников, 2019), это не является однозначным свидетельством усиления апвеллинга. Однако и тренд минимальных величин ТИА в климатических масках также указывает на значимое понижение температуры в апвеллинговой области, что

подтверждает интенсификацию апвеллинга. Для СБА тренд в величине ТИА отсутствует (рисунок не приведен).

Анализ межгодового хода площади апвеллинговой зоны для ЮБА и СБА не показал наличие значимого тренда. Другими словами, для обеих областей Бенгельского апвеллинга площадь акватории, занятой водами апвеллингового происхождения, за исследуемый 33-летний период значимо не изменилась. Вместе с тем, оценка трендовой компоненты вертикальной скорости экмановского переноса сгонного происхождения ($W_{\text{сг}}$) для ЮБА и СБА, показанная на рис. 3, ясно указывает на значимое усиление $W_{\text{сг}}$ в обеих апвеллинговых областях. В области СБА $W_{\text{сг}}$ возросла за 20 лет приблизительно на 45×10^{-7} м/с, а в области ЮБА — на 30×10^{-7} м/с. Очевидно, интенсификация экмановского апвеллинга сгонного происхождения связано с усилением вдольбереговой компоненты вектора ветрового напряжения. Как будет показано ниже, такая интенсификация явилась следствием как усиление ветра в апвеллинговой зоне, так и изменение его направления.

Возникает вопрос: почему усиление ветра сгонных направлений в области БА приводит к значимому тренду величины ТИА в южной его части, но практически не влияет на эту величину

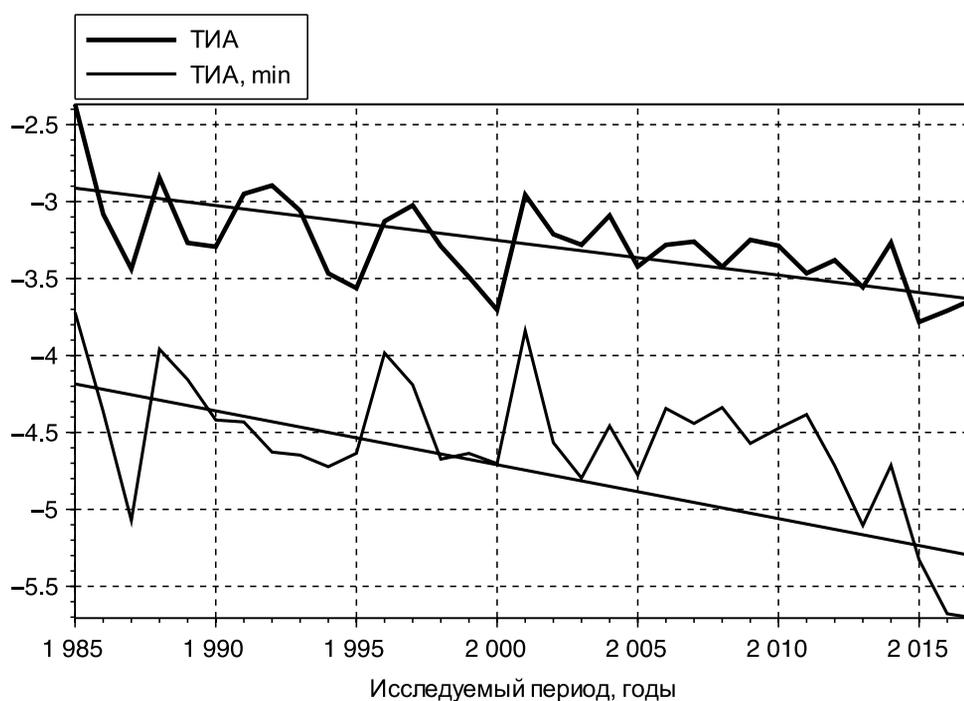


Рис. 2. Межгодовая изменчивость и тренды термического индекса апвеллинга ($^{\circ}\text{C}$) ($R^2 = 0.29$), а также межгодовой ход и тренды минимальных величин ТИА ($^{\circ}\text{C}$) ($R^2 = 0.14$), рассчитанные внутри среднемесячных климатических масок для южной части Бенгельского апвеллинга. Здесь и далее приведены только значимые на доверительном уровне 95% тренды.

в зоне действия СБА? Проверим, не является ли это следствием изменения структуры поля ветра и сопутствующего ему изменения величины завихренности касательного напряжения ветра.

Межгодовой ход и линейные тренды вертикальной скорости, обусловленной экмановской

накачкой ($W_{эн}$) для ЮБА и СБА, представлены на рис. 4. Они указывают на тот факт, что величина $W_{эн}$ значимо возросла в области действия ЮБА (на 4.4×10^{-7} м/с за 20 лет). Для области СБА, напротив, величина $W_{эн}$ уменьшился на -7.5×10^{-7} м/с за тот же период времени. Таким образом, если

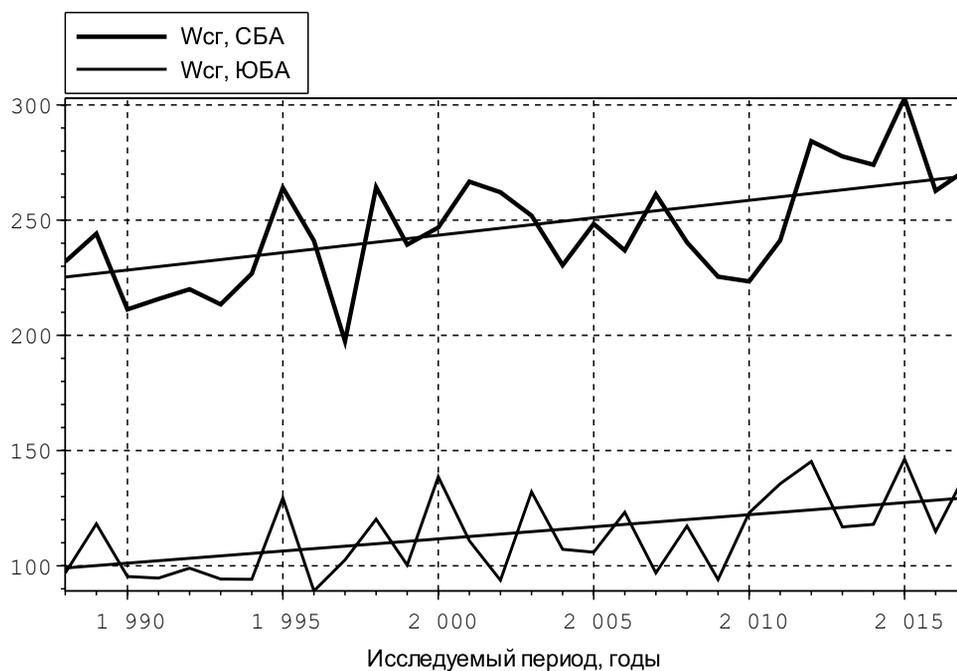


Рис. 3. Межгодовой ход величины $W_{сг}$ ($\times 10^{-7}$, м/с) и тренды, рассчитанные внутри среднемесячных климатических масок для южной ($R^2 = 0.27$) и северной ($R^2 = 0.35$) частей Бенгельского апвеллинга.

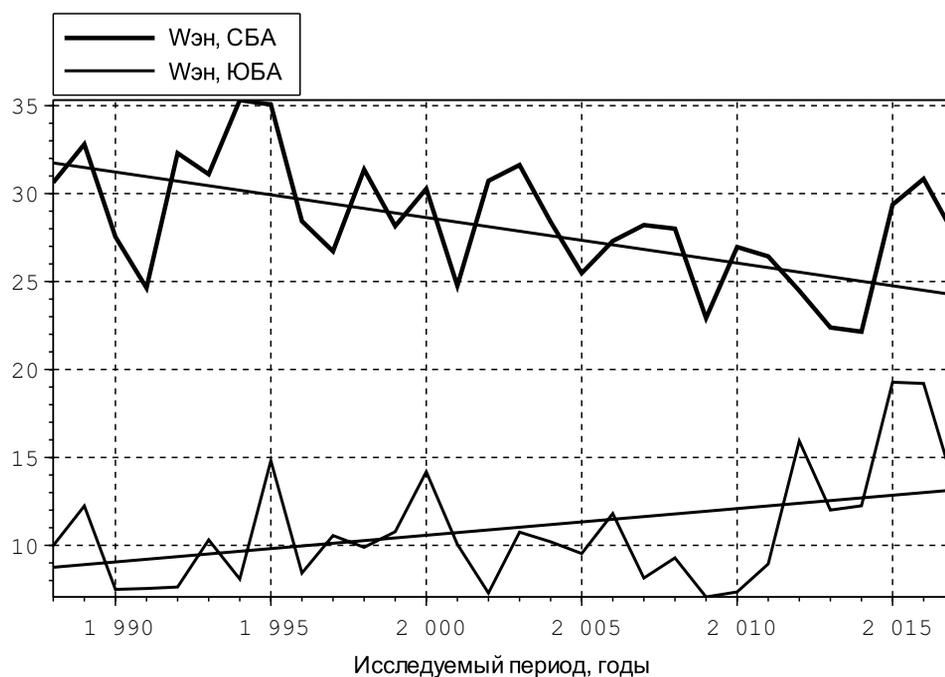


Рис. 4. Межгодовой ход величины $W_{эн}$ ($\times 10^{-7}$, м/с) и тренды, рассчитанные внутри среднемесячных климатических масок для южной части ($R^2 = 0.18$) и для северной части ($R^2 = 0.22$) Бенгельского апвеллинга.

в зоне действия ЮБА и стонный апвеллинг, и вертикальные скорости, обусловленные завихренностью приводного ветра, интенсифицируются, то в области СБА соответствующие тренды имеют противоположные знаки. Это приводит к частичной взаимной компенсации этих двух эффектов в области действия СБА.

Необходимо учесть, что абсолютная величина $W_{эн}$ существенно (по-видимому, в несколько раз) занижена не только из-за плохого качества данных о приповерхностном ветре в прибрежной зоне, но и из-за низкого разрешения (0.25°) этих данных (Полонский, Серебренников, 2019). Поэтому полученные тренды вертикальной скорости

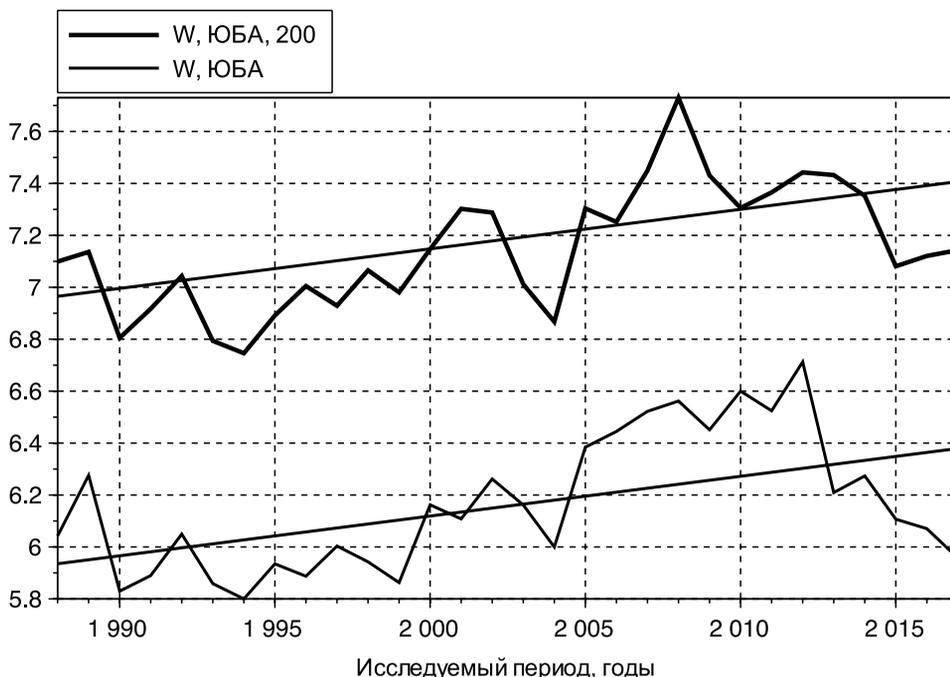


Рис. 5. Межгодовой ход модуля скорости приводного ветра (м/с) и тренды, рассчитанные внутри среднемесячных климатических масок ($R^2 = 0.38$) и внутри 200 км прибрежной области южной системы Бенгельского апвеллинга ($R^2 = 0.4$).

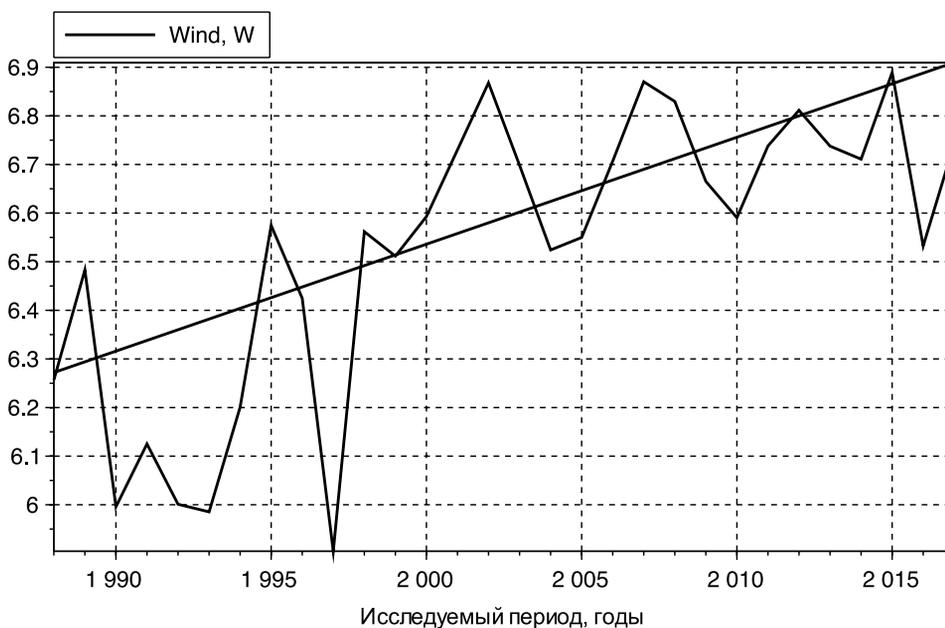


Рис. 6. Межгодовой ход модуля скорости приводного ветра (м/с) и тренд, рассчитанные внутри среднемесячных климатических масок для северной части Бенгельского апвеллинга ($R^2 = 0.53$).

Wэн необходимо увеличить по абсолютной величине в несколько раз. Тогда они будут одного порядка с трендами вертикальной скорости сгонного происхождения и смогут полностью компенсировать усиление ветрового сгона в области СБА.

Тренды скорости ветра положительны над всей акваторией БА, но над ЮБА скорость ветра растет не так быстро, как над СБА. Общее усиление ветра за 20 лет в области ЮБА составило около 0.5 м/с, а над СБА — более 0.6 м/с (рис. 5, 6). Обращает на себя внимание тот факт, что при осреднении скорости ветра по прибрежной зоне шириной 200 км модуль вектора ветра примерно на 1 м/с больше, чем при осреднении по климатическим масштабам (рис. 5). Это происходит потому, что ширина маски, оцененная по нормали к береговой черте, обычно существенно меньше 200 км (рис. 1), а скорость ветра в открытом океане обычно превышает скорость ветра у берега в анализируемом регионе.

Наряду с увеличением скорости ветра в юго-восточном секторе Атлантики наблюдается смещение центра Субтропического максимума давления на юго-восток и сопутствующий

разворот векторов приводного ветра в прибрежной зоне, особенно хорошо выраженный в области ЮБА (рис. 7). Именно это приводит к разному знаку трендов величины Wэн в областях СБА и ЮБА. Отметим расширение пассатной зоны к полюсу, проявляющееся в смене знака зональной компоненты сектора ветра в субтропической зоне Южной Атлантики (рис. 8). Аналогичное смещение Субтропического максимума в процессе потепления и миграции северной границы тропической зоны к полюсам отмечалось ранее (см., например, Lamont et al., 2018). Это является одной из возможных причин усиления скорости ветра в области юго-восточного пассата, между 5°–15° ю.ш. и 25°–35° з.д. (рис. 9).

Подчеркнем различие между тенденциями в интенсивности северо-восточного и юго-восточного пассатов. Если в Северном полушарии пассат в открытой части Атлантического океана значительно ослабевает, то в Южном он, напротив, усиливается (Desbiollesa et al., 2017). Это происходит потому, что в Южном полушарии (в отличие от Северного) не наблюдается явного уменьшения термических контрастов между экваториальной зоной и полярными регионами.

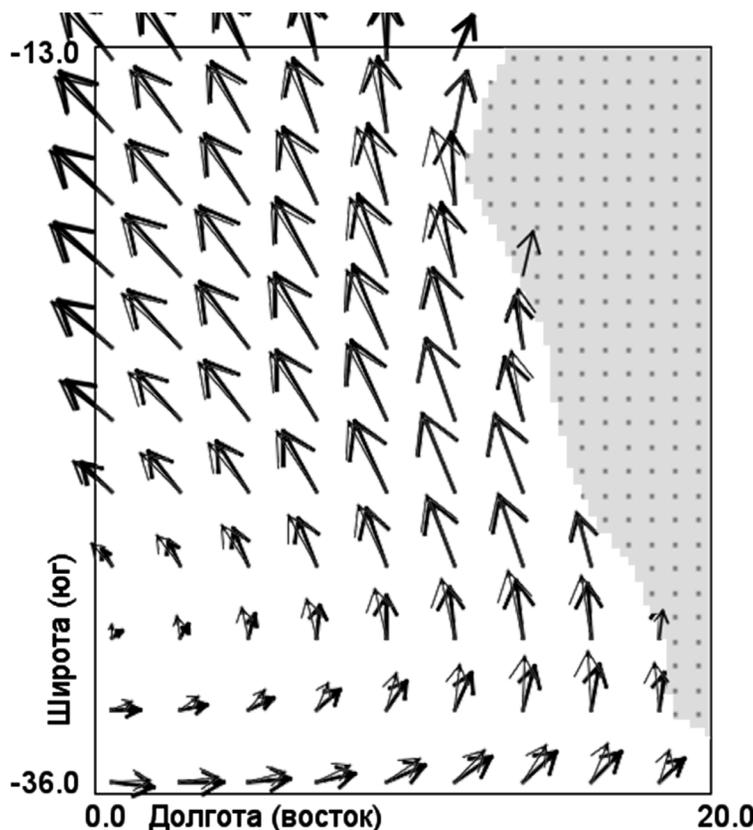


Рис. 7. Изменение поля приводного ветра. Толстые стрелочки — осредненное поле ветра за 1988–1993 гг. ($U_a = -1.3$ м/с, $V_a = 4.2$ м/с). Тонкие стрелочки — ветер за 2012–2017 гг. ($U_a = -2$ м/с, $V_a = 4.5$ м/с). U_a и V_a — средние скорости зональной и меридиональной компонент.

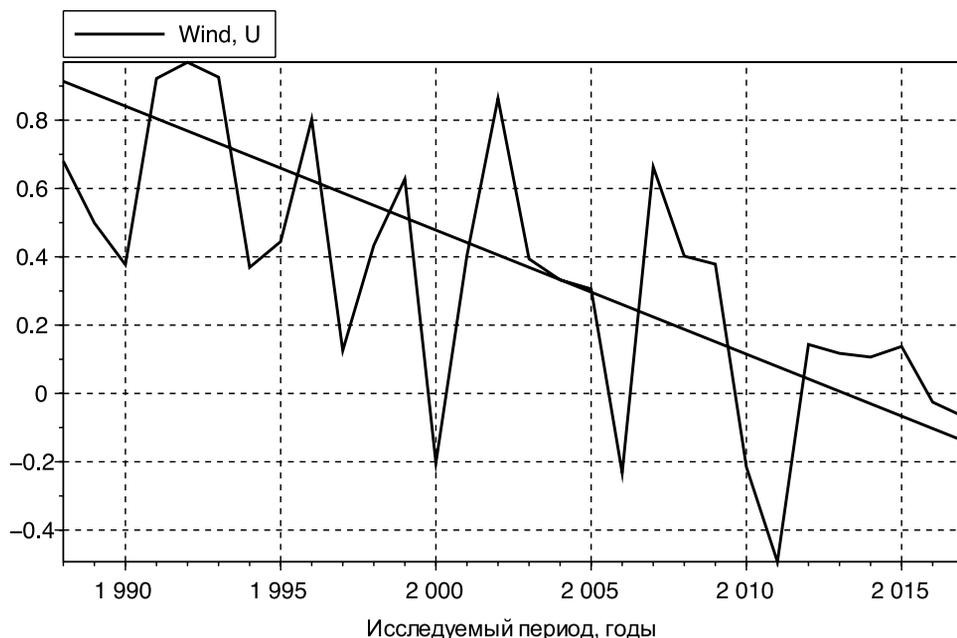


Рис. 8. Межгодовая изменчивость и тренд зональной компоненты приводного ветра (м/с) для области $35^\circ \times 27^\circ$ ю.ш. и $5^\circ \times 0^\circ$ з.д. ($R^2 = 0.32$).

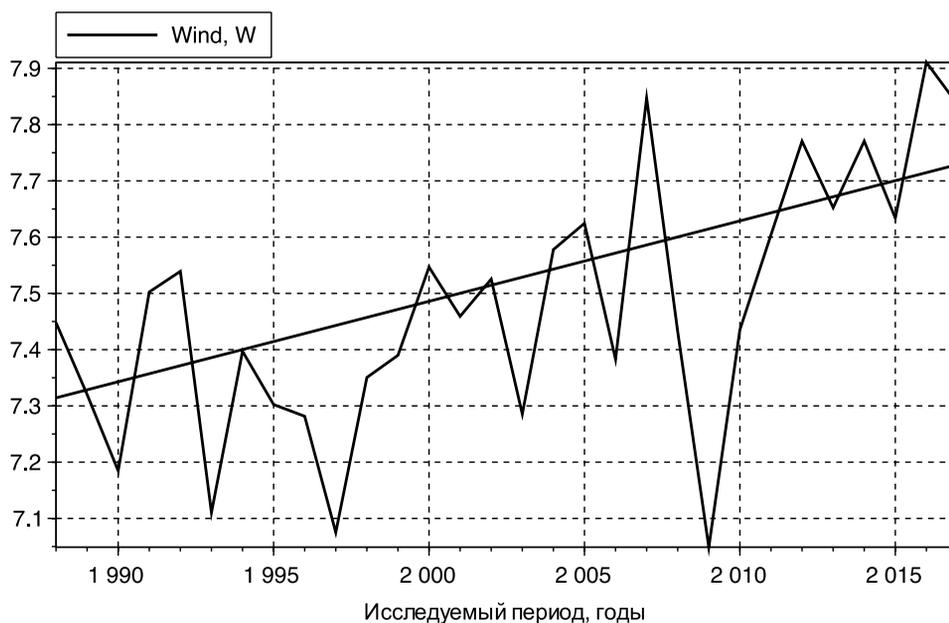


Рис. 9. Межгодовой ход и тренд скорости приводного ветра (м/с), рассчитанные для области Южной Атлантики с координатами $5^\circ\text{--}15^\circ$ ю.ш. и $25^\circ\text{--}35^\circ$ з.д. ($R^2 = 0.34$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. В последние 20 лет наблюдается значимое усиление сгонных ветров в области Бенгельского апвеллинга. Это сопровождается значимым трендом величины ТИА в южной его части, указывающим на интенсификацию апвеллинга, но

практически не влияет на эту величину в северной части БА.

2. Вероятная причина отмеченного различия в трендах величины ТИА в разных частях БА заключается в изменении структуры поля ветра в регионе и сопутствующего ему изменения величины завихренности касательного напряжения ветра. Если в зоне действия ЮБА и сгонный апвеллинг, и вертикальные скорости,

обусловленные завихренностью приводного ветра, интенсифицируются, то в области СБА соответствующие тренды имеют противоположные знаки. Это приводит к частичной взаимной компенсации этих двух эффектов в области действия СБА.

3. Причина различных тенденций вертикальной скорости в СБА и ЮБА, обусловленной завихренностью в поле ветра, заключается в расширении пассатной зоны, сопутствующем смещении центра Субтропического максимума давления в Южной Атлантике в юго-восточном направлении и усилении ветра в регионе.

4. Поскольку длина анализируемых рядов порядка одного климатического периода (~30 лет), а гидрометеорологические поля Атлантического океана подвержены существенным междесятилетним колебаниям, нельзя однозначно утверждать, что выделенные тенденции обусловлены исключительно потеплением антропогенного происхождения. Для ответа на вопрос о связи полученных тенденций с антропогенными или естественными изменениями климата необходим анализ значительно более длительных рядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Полонский А.Б., Серебрянников 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.
- Полонский А.Б., Серебрянников А.Н.* Многолетние тенденции в изменении температуры поверхности океана в зоне Канарского апвеллинга и их причины // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 1–8.
- Полонский А.Б., Серебрянников А.Н.* Об изменении температуры поверхности океана в зоне Бенгельского апвеллинга. Часть 1: сезонный цикл // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 33–44.
- Серебрянников 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.
- Backeberg B.C., Penven P., Rouault M.* Impact of intensified Indian Ocean winds on mesoscale variability in the Agulhas system // Nat. Clim. Change. 2012. V. 2. № 8. P. 608–612. doi:10.1038/nclimate1587
- 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., Field D.B., Redondo-Rodriguez A., Weeks S.J.* Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems // Global Change Biology. 2010. V. 16. № 4. P. 1213–1228. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x
- 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.
- Carr M.E.* Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing. // Deep-Sea Research 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 Research 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.pocean.2009.07.032
- Demarq H.* Trends in primary production, sea surface temperature and wind in upwelling systems (1998–2007) // Prog. Oceanogr. 2009. V. 83. P. 376–385. doi:10.1016/j.pocean.2009.07.022
- Desbiolles F., Bentamy A., Blanke B., Roy C., Mestas-Nuñez A. M., Grodsky S.A., Herbette S., Cambon G., Maes C.* Two decades [1992–2012] of surface wind analyses based on satellites scatterometer observations // J. Marine System. 2017. № 168. P. 38–56.
- Dufois F., Rouault M.* Sea surface temperature in False Bay (South Africa): Towards a better understanding of its seasonal and inter-annual variability // Continental Shelf Research. 2012. V. 43. P. 24–35.
- Hartmann D.L., Klein Tank A.M.G., Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y.A.R., ... Zhai P.* Observations: Atmosphere and surface. In Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press. 2013. Vol. 9781107057999. P. 159–254. doi.org/10.1017/CBO9781107415324.008
- 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. 151 p.
- Junker T., Schmidt M., Mohrholz V.* The relation of wind stress curl and meridional transport in the Benguela upwelling system // Journal of Marine Systems. 2015. V. 143. P. 1–6.
- Lamont T., García-Reyes M., Bograd S.J., van der Lingen C.D., Sydeman W.J.* Upwelling indices for comparative ecosystem studies: Variability in the Benguela Upwelling System // Journal of Marine Systems. 2018. V. 188 P. 3–16.
- Narayan N., Paul A., Mulitza S., Schulz M.* Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century // Ocean Sci. 2010. V. 6. P. 815–823. doi:10.5194/os-6-815-2010
- Strub P.T., Mesias J.M., Montecino V., Rutllant J., Salinas S.* Coastal ocean circulation off western South America // The Sea. Eds. A.R. Robinson, and K.H. Brink. N.Y., John Wiley and Sons. 1988. 11. P. 273–313.
- Tim N., Zorita E., Hünicke B.* Decadal variability and trends of the Benguela Upwelling System as simulated in a high ocean-only simulation // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 483–502. doi:10.5194/os-11-483-2015

On the Changes in the Sea Surface Temperature in the Benguela Upwelling Region. Part 2: The Long-Term Tendencies

A. B. Polonsky^{1,2,3}, A. N. Serebrennikov¹

¹*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol*

²*Branch of Moscow State University in Sevastopol, Sevastopol*

³*Sevastopol State University, Sevastopol*

The paper examines the issue on the long-term trends in the sea surface temperature (SST) in the Benguela upwelling zone and their causes using the daily SST satellite data for 1985–2017's and the daily near-surface wind for 1988–2017's. It is shown that in the Benguela upwelling region, there is a significant intensification of driving winds in the last 20 yrs. This is accompanied by a decrease of the thermal upwelling index (taking into account the sign of the index or an increase of its absolute values) in the southern part of the Benguela upwelling, but practically does not influence this indicator in its northern part. The likely reason for this difference is the change in the wind field structure, as a result of which there are opposite trends in the magnitude of the vorticity of the tangential wind stress in different parts of the Benguela upwelling. In the southern part of the Benguela upwelling, both the Ekman's upwelling and the vertical velocities due to the vorticity of the driving wind intensify, while in the northern part the corresponding trends have the opposite signs. This leads to a partial compensation of these two effects in the northern part of the Benguela upwelling. The reason for the change in the wind field structure is the displacement of the center of the Subtropical High to the south-east and the concomitant reversal of the near-surface wind vector in the coastal zone.

Keywords: upwelling, sea surface temperature, near-surface wind, upwelling thermal index, Ekman transfer, Ekman pumping, climate temperature trends

REFERENCES

- Backeberg B.C., Penven P., Rouault M.* Impact of intensified Indian Ocean winds on mesoscale variability in the Agulhas system // *Nat. Clim. Change*. 2012. V. 2. № 8. P. 608–612. doi:10.1038/nclimate1587
- 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., Field D.B., Redondo-Rodriguez A., Weeks S.J.* Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems // *Global Change Biology*. 2010. V. 16. № 4. P. 1213–1228. doi.org/10.1111/j.1365–2486.2009.02094.x
- 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.
- Carr M.E.* Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing. // *Deep-Sea Research 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 Research 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.pocean.2009.07.032
- Demarq H.* Trends in primary production, sea surface temperature and wind in upwelling systems (1998–2007) // *Prog. Oceanogr.* 2009. V. 83. P. 376–385. doi:10.1016/j.pocean.2009.07.022
- Desbiollesa F., Bentamy A., Blanke B., Roy C., Mestas-Nuñez A. M., Grodsky S.A., Herbet S., Cambon G., Maes C.* Two decades [1992–2012] of surface wind analyses based on satellites scatterometer observations // *J. Marine System*. 2017. № 168. P. 38–56.
- Dufois F., Rouault M.* Sea surface temperature in False Bay (South Africa): Towards a better understanding of its seasonal and inter-annual variability // *Continental Shelf Research*. 2012. V. 43. P. 24–35.
- Hartmann D.L., Klein Tank A.M.G., Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y.A.R., Zhai P.* Observations: Atmosphere and surface. In *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* // Cambridge University Press. 2013. V. 9781107057999. P. 159–254. doi.org/10.1017/CBO9781107415324.008
- 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. 151 p.
- Junker T., Schmidt M., Mohrholz V.* The relation of wind stress curl and meridional transport in the Benguela upwelling system // *Journal of Marine Systems*. 2015. V. 143. P. 1–6.
- Lamont T., García-Reyes M., Bograd S.J., van der Lingen C.D., Sydeman W.J.* Upwelling indices for comparative ecosystem studies: Variability in the Benguela Upwelling System // *Journal of Marine Systems*. 2018. V. 188 P. 3–16.

- Narayan N., Paul A., Mulitza S., Schulz M.* Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century // *Ocean Sci.* 2010. V. 6. P. 815–823. doi:10.5194/os-6-815-2010
- Polonskii A.B., Serebrennikov A.N.* Mezhsodovye i vnutrimesyachnye fluktuatsii polya vetra i temperatury poverkhnosti okeana v zone Zapadno-Afrikanskogo apvellinga po sputnikovym dannym [Interannual and intramonth fluctuations of the wind field and ocean surface temperature in the West African upwelling zone using satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2017. № 5. P. 14–19. (in Russian).
- Polonskii A.B., Serebrennikov A.N.* Mnogoletnie tendentsii v izmenenii temperatury poverkhnosti okeana v zone Kanarskogo apvellinga i ikh prichiny [Long-term trends in the temperature of the ocean surface in the Canary upwelling zone and their causes] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2018. № 3. P. 1–8. (in Russian).
- Polonskii A.B., Serebrennikov A.N.* Ob izmenenii temperatury poverkhnosti okeana v zone Bengel'skogo apvellinga. Chast' 1: sezonnyi tsikl [On the change in the temperature of the ocean surface in the Benguela upwelling zone. Part 1: seasonal cycle] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2019. № 3. P. 33–44. (in Russian).
- Serebrennikov A.N.* Uluchshennaya metodika opredeleniya indeksov pribrezhnykh apvellinov po sputnikovym dannym [Improved method for determining coastal upwelling indices using satellite data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2018. V. 15. № 5. P. 44–51. (in Russian).
- Strub P.T., Mesias J.M., Montecino V., Ruilland J., Salinas S.* Coastal ocean circulation off western South America // *The Sea.* Eds. A.R. Robinson, and K.H. Brink. N.Y., John Wiley and Sons, 1988, 11, P. 273–313.
- Tim N., Zorita E., Hünicke B.* Decadal variability and trends of the Benguela Upwelling System as simulated in a high ocean-only simulation // *Ocean Sci.* 2015. V. 11. P. 483–502. doi:10.5194/os-11-483-2015