_____ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ __ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ВОСТОЧНЫХ ПОГРАНИЧНЫХ АПВЕЛИНГОВЫХ СИСТЕМ ПО РАЗЛИЧНЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ. Ч. 2: АПВЕЛЛИНГИ В ТИХОМ ОКЕАНЕ

© 2021 г. А. Б. Полонский^{а,} *, А. Н. Серебренников^а

^аФГБНУ "Институт природно-технических систем", Севастополь, Россия *E-mail: apolonsky5@mail.ru

Поступила в редакцию 17.04.2021 г.

На основании спутниковых данных о температуре поверхности океана и трех наборах данных о приповерхностном ветре, подготовленных разными научно-исследовательскими группами, приводится сравнительная оценка долгопериодных тенденций интенсивности крупнейших Тихоокеанских апвеллингов (Калифорнийского, Перуанского и Чилийского). Методика оценки таких тенденций аналогична использованной в первой части работы, посвященной Атлантическим апвеллингам. Так же, как и в случае с Атлантическими апвеллингами, различия абсолютных вертикальных скоростей, рассчитанных по разным данным и обусловленных сгонным эффектом и горизонтальной неоднородностью поля ветра, достигают нескольких десятков и даже ста процентов. При этом выделенные тенденции демонстрируют общее усиление апвеллингов с 1980-х гг., что подтверждают опубликованные данные об интенсификации Калифорнийского, Перуанского и Чилийского апвеллингов в период глобального потепления. Однако не все Тихоокеанские апвеллинги демонстрируют монотонную интенсификацию на протяжении всего периода исследования. Это свидетельствует о важнейшей роли естественных климатических вариаций междесятилетнего масштаба в формировании изменчивости интенсивности апвеллингов в период проведения регулярных спутниковых измерений.

Ключевые слова: апвеллинг, температура поверхности океана, термический индекс апвеллинга, экмановские транспорт и накачка, межгодовая изменчивость, тренды DOI: 10.31857/S0205961421060075

ВВЕДЕНИЕ

Восточные пограничные апвеллинговые системы (ВПАС) Мирового океана, возникающие, прежде всего, вследствие сгонного эффекта преобладающей системы ветров, представляют собой высокопродуктивные и динамически активные зоны Мирового океана. Важность ВПАС как с климатической, так и с промысловой точек зрения, обоснована в многочисленной литературе (Cushing, 1971; Herbland and Voituriez, 1974; Minas et al., 1982; Carr, 2002; Carr and Kearns, 2003; Chavez and Messie, 2009; Fréon et al., 2009; Upwelling, 2013). Поэтому актуальность мониторинга характеристик крупнейших апвеллинговых систем в условиях меняющегося климата не вызывает сомнений.

Пользуясь спутниковыми данными, апвеллинг можно выделить по температуре поверхности океана (ТПО), которая понижается в зоне подъема вод, по интенсивности вдольберегового приповерхностного ветра (ПВ) в непосредственной близости от берега (на расстоянии порядка радиуса деформации Россби) и по завихренности

ПВ в апвеллинговой зоне. Для большей достоверности количественной оценки пространственной протяженности и интенсивности подъема вод в районе апвеллинга эти параметры рекомендуется использовать совместно (Полонский, Серебренников, 2020).

Хотя анализу крупнейших прибрежных апвеллингов посвящено множество опубликованных работ (Bakun, 1973; Bakun, 1990; Bakun et al., 2015; Belmadani et al., 2014; García-Reves et al., 2015; Varela et al., 2015; Tim et al., 2015), до сих пор отсутствует единая точка зрения на долгопериодные тенденции в интенсивности ВПАС. Это связано с объективными причинами: недостаточной продолжительностью ветровых и температурных временных рядов в окрестности апвеллинговых систем; низкое разрешение и качество данных по приповерхностному ветру, особенно в непосредственной близости от берега, где собственно и формируется прибрежный апвеллинг. Кроме этого, пространственно-временная изменчивость ТПО не всегда однозначно характеризует процессы апвеллинга, поскольку ТПО определяется не только вертикальными движениями, но и горизонтальными адвективными переносами, а также интенсивностью процессов перемешивания вод (Ross, 1985; Upwelling, 2013; Полонский, Серебренников, 2020; 2021б).

Проблемы спутниковых измерений ПВ и сравнительная оценка долгопериодных тенденций интенсивности крупнейших Атлантических ВПАС (Канарской и Бенгельской) с использованием данных о ТПО, различных наборов данных о ПВ и классической экмановской теории (Ектап, 1905) изложены в 1-й части работы (Полонский, Серебренников, 2021б). В настоящей работе будет дана сравнительная оценка долгопериодных тенденций интенсивности крупнейших Тихоокеанских ВПАС, куда входят Калифорнийский, Перуанский и Чилийский апвеллинги.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание источников данных, методов расчета параметров апвеллингов и краткая характеристика методов предварительной обработки ПВ изложены в 1-й части работы (Полонский, Серебренников, 20216).

Для расчета тенденций интенсивности апвеллингов по пространственно-временной изменчивости ТПО использовались спутниковые данные о температуре с разрешением $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ с 1982 по 2019 гг., подготовленные коллективом Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSST, https://www.ghrsst.org, версия v.2.0). По этим данным рассчитывались величины термического индекса апвеллинга (ТИА), который определяется как разница ТПО между относительно холодным прибрежным апвеллинговым районом и более теплой, удаленной на некоторое расстояние от берега, акваторией на одной и той же широте. В данной работе в качестве апвеллингового района рассматривалась прибрежная полоса акватории шириной 0.5°, а удаленной акваторией считалась полоса такой же ширины, расположенная на расстоянии 1.5° от берега. Выбор более мористой удаленной (оффшорной) зоны приводит к большей средней величине ТИА, но тренд ТИА при этом изменяется незначительно.

По минимальным значениям ТИА строились линейная, кубическая и квантильная регрессии. За величину отклонения линейного тренда от кубической аппроксимации ряда был принят безразмерный коэффициент достоверности CF (confidence factor), основанный на расчете дисперсии вариаций кубической аппроксимации относительно линейного тренда. Наряду с коэффициент том детерминации (R^2), коэффициент достоверности (CF) характеризует значимость линейного тренда ряда. СF изменяется от 0 до 1, где 0 присваивается линейному тренду, не описывающему долговременные тенденции изменений ТИА, а 1 — линейному тренду, очень хорошо аппрокси-

мирующему эти тенденции (Полонский, Серебренников, 2021а). Расчет минимальных значений ТИА выполнялся для каждой географической широты.

Для расчета тенденций интенсивности апвеллингов по суммарной экмановской скорости подъема воды, обусловленной экмановским сгоном (транспортом) (Weui) и завихренностью дрейфовых течений (Wep), использовались три различных набора векторных данных с 6-и часовым временным разрешением и пространственным разрешением 0.25° × 0.25°:

– данные о ПВ ССМР ОСW (Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind) за 31-летний период (с 1988 по 2018 гг.), версии v.2.0, полученные с сайта PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), NASA (www.remss.com). В дальнейшем обозначим этот набор данных как "ССМР ПВ";

– комбинированные данные о ПВ с различных спутников за 27-летний период (с 1992 по 2018 гг.), полученные с сайта CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Данные доступны по ссылке https://marine.copernicus.eu. Обозначим этот набор данных как "Copernicus ПВ";

– комбинированные данные о скорости и направлении ПВ с различных спутников за 30-летний период (с 1988 по 2017 гг.), полученные с сайта NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Обновление этих данных на сайте ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/seawinds/ прекратились в 2018 г. Обозначим этот набор данных как "Eclipse ПВ".

Более подробное описание методов предварительной обработки ПВ можно найти в 1-й части работы (Полонский Серебренников, 20216).

При расчете транспорта и накачки, обусловленных экмановскими течениями, 6-часовые наборы данных ПВ были усреднены до 24-х часовых. При этом использовались только данные о ПВ. скорости которых лежали в диапазоне 4-20 м/с. Экмановские параметры рассчитывались за каждый день и для каждой точки в области шириной 1.25°, вплотную прилегающей к берегу. Экмановский транспорт усреднялся на каждой широте по выбранной полосе. При этом проводилась фильтрация некачественных данных у берега по следующему алгоритму. Экмановский транспорт в ближайших к берегу трех точках заменялся их медианным значением, которое входило в расчет среднего арифметического для каждой широты. При расчете экмановской накачки производные вычислялись и усреднялись в каждом боксе размером $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ и относились к его центру.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 показана межгодовая изменчивость, линейный тренд, квантильная медианная регрес-



Рис. 1. Межгодовая изменчивость, линейный тренд (сплошная линия), квантильная медианная регрессия (штриховая линия, совпадающая с линейным трендом) и кубическая аппроксимация (пунктирная кривая) минимальных значений ТИА для Калифорнийского апвеллинга за 1982–2019 гг. На врезке справа показана ТПО в окрестности Калифорнийского апвеллинга за средне-климатический июнь.

На рис. 1 использованы следующие обозначения и сокращения:

"Lin Reg $R^2 = 0.40$ " – линейная регрессия с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.40$; "Q Reg: 0.5" – квантильная регрессия с квантилем распределения $\tau = 0.5$ (медиана);

"Cubic Reg" – кубическая аппроксимация;

"CF = 0.68" – коэффициент достоверности, показывающий близость кубической аппроксимации к линейной perpecсии (СГ изменяется от 0 до 1 в порядке возрастания достоверности);

"n = 137" – количество выбранных для обработки точек в области апвеллинга с минимальными значениями ТИА;

"*m* = 9, 5, 6, 8, 4" – номера обрабатываемых месяцев (сентябрь, май, ..., апрель) в порядке уменьшения коэффициента детерминации линейного тренда, рассчитанного для каждого месяца.

сия и кубическая аппроксимация минимальных значений ТИА для Калифорнийского апвеллинга, а на рис. 2–4 аналогичные характеристики для суммарной скорости подъема воды, обусловленной сгонным (экмановским) эффектом и завихренностью в поле ветра (экмановской накачкой). Рассмотрим временную изменчивость ТИА и влияние выбора различных наборов данных о приповерхностном ветре на временной ход скорости подъема вод. После этого перейдем к аналогичному анализу для Перуанского и Чилийского апвеллингов.

В целом все расчеты по разным наборам данных о поле ветра указывают на интенсификацию Калифорнийского апвеллинга. При этом линейный тренд суммарной вертикальной скорости ветрового происхождения, рассчитанный по данным "ССМР ПВ" за 1988-2018 гг., характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0.26$ (рис. 2), R^2 , оцененный по данным "Copernicus ПВ" за 1992-2018 гг., равен 0.21 (рис. 3), а по данным "Eclipse ПВ" за 1988-2017 гг. - 0.12 (рис. 4). Необходимо отметить, что для первых 2-х наборов данных коэффициент детерминации выделенного тренд вообще незначим. Долговременные тенденции минимальных значений ТИА подтверждают интенсификацию Калифорнийского апвелинга с большим уровнем значимости по сравнению с приведенными выше величинами. По минимальным значениям ТИА в области Калифорнийского апвелинга выделяется линейный тренд, косвенно указывающий на интенсификацию подъема подповерхностных относительно холодных вод. Коэффициент детерминации тренда достигает 0.40 (рис. 1). Вместе с тем, следует отметить, что линейный тренд явно не является оптимальной аппроксимацией долговременной изменчивости ТИА. Из рис. 1 видно, что апвеллинг по данным о ТПО в целом интенсифицировался до 1997 г., затем до 2016 г. преобладала межгодовая изменчивость температуры без выраженной тенденции изменения средней величины ТИА, а с 2017 г. индекс ТИА снова начал резко уменьшаться (расти по абсолютной величине). Временной ход вертикальной скорости ветрового происхождения, представленный на рис. 2-4, также свидетельствует о немонотонном характере междесятилетней изменчивости интенсивности Кали-

линейного тренда невелик, а для "Eclipse ПВ"



Рис. 2. Межгодовая изменчивость суммарной скорости подъема воды, обусловленной экмановскими течениями (Weui + Wep) для Калифорнийского апвеллинга. В расчетах использовался набор данных "ССМР ПВ" за 1988–2018 гг. Положительные величины вертикальной скорости указывают на восходящие движения. Сверху приведен осредненный за весь анализируемый период вклад экмановского транспорта и накачки (в %).



Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но по набору данных "Copernicus ПВ" за 1992-2018 гг.

форнийского апвеллинга. Другими словами, вероятно наличие существенной квазипериодической изменчивости в интенсивности ветрового апвеллинга междесятилетнего масштаба в этой области Тихого океана, вызванной естественными процессами в климатической системе и происходящими на фоне антропогенно-обусловленного потепления.

Подчеркнем, что (так же, как это имело место в случае с Атлантическими апвеллингами) абсолютные величины вертикальной скорости ветрового происхождения, оцененные по разным наборам данных, очень сильно различаются между собой. Типичные величины вертикальной скорости, рассчитанные по наборам данных "ССМР ПВ" и "Copernicus ПВ", составляют порядка (110–115) × 10^{-7} м/с (рис. 2, 3), а для набора данных "Eclipse ПВ" вертикальная скорость увеличивается в среднем до 250×10^{-7} м/с (рис. 4). В основном, эти расхождения связаны с использованием различных методик обработки данных и применением различных процедур сглаживания и интерполяции спутниковых измерений.



Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но по набору данных "Eclipse ПВ" за 1988-2017 гг.

Перейдем к анализу тенденций интенсивности Перуанского апвеллинга, которые демонстрируются временными рядами ТИА и вертикальными движениями ветрового происхождения, представленными соответственно на рис. 5 и рис. 6-8. Так же, как и в случае Калифорнийского апвеллинга, в целом за весь рассматриваемый период отмечается интенсификация Перуанского апвеллинга. При этом коэффициенты детерминации линейного тренда интенсивности вертикальных движений для Перуанского апвеллинга. оцененные по двум наборам данных, выше, чем для Калифорнийского, а по третьему набору данных — ниже. Коэффициенты детерминации (R^2) и достоверности (CF) линейного тренда вертикальных скоростей ветрового происхождения, рассчитанные по набору данных "ССМР ПВ" за 1988-2018 гг., составляют 0.42 и 0.45 соответственно, для массива "Eclipse ПВ" за 1988-2017 гг. - 0.74 и 0.42 (рис. 6 и 8), а для вертикальных движений, оцененных с использованием массива "Copernicus ПВ" за 1992-2018 гг., этот тренд вообще близок к нулю, а $R^2 = 0.03$ (рис. 7). Данные по минимальным значениям ТИА полтверждают интенсификацию Перуанского апвелинга с коэффициентами детерминации и достоверности линейного тренда равными 0.24 и 0.82 соответственно (рис. 5). В целом, несмотря на различия приведенных величин с соответствующими величинами, рассчитанными для Калифорнийского апвеллинга, общий вывод одинаков. И в первом, и во втором случаях линейный тренд не является хорошей аппроксимацией долговременных тенденций интенсивности апвеллингов, оцененных по большинству наборов данных.

Типичные величины вертикальной скорости в области Перуанского апвеллинга, оцененные по

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 6 2021

различным наборам данных, существенно различаются между собой. Для наборов данных "ССМР ПВ" и "Eclipse ПВ" они составляют порядка (315–325) × 10^{-7} м/с (рис. 6, 8), а для набора данных "Сорегпісиз ПВ" около 200 × 10^{-7} м/с (рис. 7). При этом подтверждается отмеченный ранее факт (см., (Полонский, Серебренников, 2020)) о значительно большем вкладе в суммарные вертикальные скорости в области Перуанского апвеллинга экмановской накачки, чем в других апвеллингах, входящих в ВПАС.

Рассмотрим теперь тенденции изменений ТИА и вертикальной скорости в области Чилийского апвеллинга (рис. 9-12). Тренды в изменчивости минимальных значений ТИА для Чилийского апвеллинга по своему характеру такие же, как и для Калифорнийского апвеллинга, но с более высоким коэффициентам детерминации (0.67 против 0.40). Линейный тренд суммарной вертикальной скорости ветрового происхождения, рассчитанный по данным "ССМР ПВ" за 1988-2018 гг. (рис. 10), характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0.50$. Причем рост интенсивности апвеллинга наблюдался с 1998 по 2007 гг. С 1988 по 1997 гг. и с 2008 г. преобладала межгодовая изменчивость без выраженных более долгопериодных тенденций. Согласно данным "Copernicus ПВ" за 1992-2018 гг. (рис. 11), наблюдался рост интенсивности апвеллинга с коэффициентами детерминации и достоверности 0.37 и 0.97 соответственно. Набор данных "Eclipse ПВ" за 1988-2017 гг. (рис. 12) показывает незначимый коэффициент детерминации ($R^2 = 0.1$) и коэффициент достоверности, равный нулю.

Абсолютная величина вертикальной скорости ветрового происхождения, оцененная по набору данных "ССМР ПВ", значительно отличается от



Рис. 5. Межгодовая изменчивость, линейный тренд (сплошная линия), квантильная медианная регрессия (штриховая линия) и кубическая аппроксимация (пунктирная кривая) минимальных значений ТИА для Перуанского апвеллинга за 1982—2019 гг. На врезке справа показана ТПО в окрестности Перуанского апвеллинга за средне-климатический июнь.



Рис. 6. Межгодовая изменчивость суммарной скорости подъема воды, обусловленной экмановскими течениями (Weui + Wep) для Перуанского апвеллинга. В расчетах использовался набор данных "ССМР ПВ" за 1988–2018 гг.

величины, рассчитанной по наборам данных "Сорегпісия ПВ" и "Eclipse ПВ". Типичные величина для первого набора данных составляет порядка 310×10^{-7} м/с (рис. 10), а для второго и третьего — около 220×10^{-7} м/с (рис. 11, 12).

В целом, все расчеты по разным наборам данных о поле ветра и расчет минимальных значений ТИА указывают на интенсификацию Чилийского апвеллинга. Вместе с тем, можно снова констатировать, что для Чилийского апвеллинга (как и для Калифорнийского и Перуанского), линейный тренд не является оптимальной аппроксимацией долговременной изменчивости большинства рассматриваемых параметров. Все временные ряды, характеризующие тенденции интенсивности Чилийского апвеллинга, указывают на наличие более сложных междесятилетних изменений, чем



Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но по набору данных "Copernicus ПВ" за 1992-2018 гг.



Рис. 8. То же, что и на рис. 6, но по набору данных "Eclipse ПВ" за 1988-2017 гг.

простой линейный тренд (рис. 9–12). Эти изменения характеризуют не столько общую интенсификацию апвеллингов, сколько междесятилетние колебания в системе "океан—атмосфера" естественного происхождения.

Межгодовая изменчивость суммарной скорости подъема воды (Weui + Wep) для Калифорнийского, Перуанского и Чилийского апвеллингов ранее рассчитывались авторами для набора данных "Copernicus ПВ" (Полонский, Серебренников, 2020). Вклады в общую скорость подъема воды экмановского транспорта и накачки для этих апвеллингов, полученные в нашей работе 2020 г., практически совпадают с вкладами, рассчитанными в настоящей работе. Совпадают также по форме графики межгодовых изменений вертикальных скоростей. При этом абсолютные значения скоростей различаются. Это связано с различиями в методике обработки ПВ: в настоящей работе ветер рассчитывался в меньшей по ширине прибрежной полосе (1.25° против 1.75° в работе 2020 г.), и было добавлено ограничение на модуль скорости ветра (напомним, что в настоящей работе использовались только данные о ветрах, скорость которых лежала в диапазоне 4—20 м/с). В результате рассчитанные в настоящей работе вертикальные скорости в обоих апвеллингах оказались примерно на 30% больше, чем оцененные в работе (Полонский, Серебренников, 2020).



Рис. 9. Межгодовая изменчивость, линейный тренд (сплошная линия), квантильная медианная регрессия (штриховая линия) и кубическая аппроксимация (пунктирная кривая) минимальных значений ТИА для Чилийского апвеллинга за 1982—2019 гг. На врезке справа показана ТПО в окрестности Чилийского апвеллинга за средне-климатический июнь.



Рис. 10. Межгодовая изменчивость суммарной скорости подъема воды, обусловленной экмановскими течениями (Weui + Wep) для Чилийского апвеллинга. В расчетах использовался набор данных "ССМР ПВ" за 1988–2018 гг.

В табл. 1 показано влияние выбора набора данных о ветре на тренды суммарной скорости подъема воды в Калифорнийском, Перуанском и Чилийском апвеллингах. Сравнение линейных трендов было сделано за общий (одинаковый) для всех наборов ветров период исследования (1992— 2017 гг.). Хорошо видно, что максимальные величины линейного тренда, а также наибольшие значения суммарной скорости подъема воды (Weui + Wep) для всех апвеллингов показали графики, построенные по данные "Eclipse ПВ" (если рассматривать только значимые величины). Для всех наборов ПВ Калифорнийский апвеллинг характеризуется наименьшей скоростью подъема вод, чего нельзя сказать о величине тренда суммарной вертикальной скорости.



Рис. 11. То же, что на рис. 10, но по набору данных "Copernicus ПВ" за 1992-2018 гг.



Рис. 12. То же, что на рис. 10, но по набору данных "Eclipse ПВ" за 1988-2017 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, можно сделать вывод, что, несмотря на все различия в методиках расчета ПВ по спутниковым данным, полученных различными научно-исследовательскими группами, долгопериодные тенденции суммарной скорости подъема воды для Калифорнийского, Перуанского и Чилийского апвеллингов с 1980-х годов указывают на их усиление. Тенденции межгодовых изменения минимальных значений ТИА также подтверждают усиление крупнейших апвеллингов Тихого океана. Однако это усиление немонотонно. Практически все апвеллинги для разных наборов ветров показали интенсификацию в начале и/или середине рассматриваемого временного отрезка. В дальнейшем эта интенсификация резко замедлилась или даже вообще прекратилась. Например, для Чилийского апвеллинга рост суммарной скорости подъема воды, построенной по набору данных "ССМР ПВ", практически прекратился начиная с 2008 г. В области Калифорнийского и Чилийского апвеллингов минимальные значения их термического индекса в период с 2001 по 2016 гг. не росли по абсолютной величине. Это свидетельствует о важной роли естественных междесятилетних вариаций интенсивности апвеллингов. Поэтому, несмотря на то, что формально за 30-летний период наблюдается усиление Калифорнийского, Перуанского и Чилийского апвеллингов,

ПОЛОНСКИЙ, СЕРЕБРЕННИКОВ

Анализируемые апвеллинги в Тихом океане	Суммарная вертикальная скорость (Weui + Wep) для ветра "ССМР ПВ"			Суммарная вертикальная скорость (Weui + Wep) для ветра "Copernicus ПВ"			Суммарная вертикальная скорость (Weui + Wep) для ветра "Eclipse ПВ"		
	R^2	Мах 10 ⁻⁷ м/с	Inc 10 ⁻⁷ м/с	R^2	Мах 10 ⁻⁷ м/с	Inc 10 ⁻⁷ м/с	R^2	Мах 10 ⁻⁷ м/с	Inc 10 ⁻⁷ м/с
Калифорнийский	0.31	162.3	88.0	0.17	127.7	44.3	0.41	317.6	142.7
Перуанский	0.43	344.2	57.2	0.03	204.5	9.4	0.82	406.1	173.8
Чилийский	0.52	352.3	69.2	0.31	239.8	31.1	0.26	348.6	227.9

Таблица 1. Параметры линейных трендов межгодовой изменчивости суммарной скорости подъема воды для рассматриваемых Тихоокеанских апвеллингов. Анализируемый период: 1992–2017 гг.

Примечания. R^2 – коэффициент детерминации линейного тренда; Мах – значение вертикальной скорости, рассчитанное по уравнению линейной регрессии для 2017 г. (максимальное значение, обусловленное линейным трендом за рассматриваемый период); Inc – общее приращение вертикальной скорости за весь анализируемый период, связанное с линейным трендом. Незначимые величины показаны курсивом. Для зачеркнутых величин CF = 0.

невозможно сделать однозначный вывод об антропогенном характере их интенсификации на временном отрезке, длина которого порядка одного климатического периода.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за высокопрофессиональную и доброжелательную оценку первого варианта рукописи и полезные замечания по ее доработке.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена 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

Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Интенсификация восточных пограничных апвеллинговых систем в Атлантическом и Тихом океанах. // Метеорология и Гидрология, 2020. № 5. С. 86–95.

Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Модифицированная методика вычисления параметров климатической изменчивости апвеллингов по термическому индексу // Исслед. Земли из космоса. 2021а. № 1. С. 67–77. https://doi.org/10.31857/S0205961421010085

Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Долгопериодные тенденции интенсивности восточных пограничных апвелинговых систем по различным спутниковым данным. Ч. 1: Атлантические апвеллинги // Исслед. Земли из космоса. 20216. № 5. С. 31–45.

Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946–71 // U.S. Dep. Commer. 1973. 103 (NOAA Technical Report, NMFS SSRF-671).

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.

https://doi.org/10.1007/s00382-013-2015-2

Carr M.E. Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing // Deep-Sea Res. 2002. V. 49. \mathbb{N} 1–3. P. 59–80.

Carr M.E., Kearns E. Production regimes in four Eastern Boundary Current systems // Deep-Sea Res. 2003. V. 50. P. 3199–3221.

Chavez F.P., Messie M. A comparison of east-ern boundary upwelling ecosystems // Prog. Oceanogr. 2009. V. 83. № 1–4. P. 80–96.

https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032

Cushing D.H. Upwelling and the production of fish // Adv. Mar. Biol. 1971. V. 9. P. 255–334.

https://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60344-2

Ekman V. On the influence of the earth's rotation on ocean currents // Ark. Mat. Astron. Fys. 1905. V. 2. P. 1–53.

Fréon P., Barange M., Aristegui J. Eastern boundary upwelling ecosystems: integrative and comparative approaches // Prog. Oceanogr. 2009. V. 83. P. 1–14.

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

Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling maur-itanien en mars 1973 // Cah. O.R.ST.OM., Sér. Océanogr. 1974. V. 12(3). P. 187–201.

Minas H.J., Codispoti L., Dugdale R. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa // Rapp. P-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer. 1982. V. 180. P. 148–183.

Ross D.B., Cardone V.J., Overland J., McPherson R.D., Pierson W.J. Jr., Yu T. Oceanic surface winds // Adv. Geophys. 1985. V. 27. P. 101–138.

https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60404-5

Tim N., Zorita E., Hünicke B. Decadal variability and trends of the Benguela Upwelling System as simulated in a high ocean-only simulation // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 483–502. https://doi.org/10.5194/os-11-483-2015

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

Varela R., Álvarez I., Santos F., et al. Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982–2010? // Sci. Rep. 2015. V. 5. 10016.

https://doi.org/10.1038/srep10016

Influence of Different Satellite Data on Surface Winds on Coastal Upwelling. Part 2: Pacific Ocean

A. B. Polonsky¹ and A. N. Serebrennikov¹

¹Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

Based on satellite data on the ocean surface temperature and three sets of near-surface wind data prepared by different research groups, a comparative assessment of long-term trends in the intensity of the largest Pacific upwellings (California, Peruvian, and Chilean) is done. The methodology for assessing of such trends is similar to that used in the first part of the work devoted to the Atlantic upwellings. As well as in the case of the Atlantic upwellings, the differences in absolute vertical velocities, calculated from different data and due to the surge effect and horizontal inhomogeneity of the wind field, reach several tens and even one hundred percent. At the same time, the identified trends demonstrate a general strengthening of upwellings since the 1980s, it confirms the published data on the intensification of the California, Peruvian, and Chilean upwellings during the global warming period. However, not all Pacific upwellings show monotonic intensification throughout the study period. This indicates the most important role of natural climatic variations on an interdecadal scale in the formation of variability in the intensity of upwellings during the period of regular satellite measurements.

Keywords: upwelling, ocean surface temperature, thermal upwelling index, Ekman transport and pumping, interannual variability, long-term trends

REFERENCES

Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946–1971 // U.S. Dep. Commer. 1973. 103 (NOAA Technical Report, NMFS SSRF-671).

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., 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. 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 upwelling off Peru and Chile? // Climate Dynamics. 2014. V. 43. \mathbb{N}_{2} 7–8. P. 1893–1914. DOI: 10.1007/s00382-013-2015-2

Carr M.E. Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing // Deep-Sea Res. 2002. V. 49. \mathbb{N}_{2} 1–3. P. 59–80.

Carr M.E., Kearns E. Production regimes in four Eastern Boundary Current systems // Deep-Sea Res. 2003. V. 50. P. 3199–3221.

Chavez F.P., Messie M. A comparison of east-ern boundary upwelling ecosystems // Prog. Oceanogr. 2009. V. 83. № 1–4. P. 80–96. DOI: 10.1016/j.pocean.2009.07.032

Cushing D.H. Upwelling and the production of fish // Adv. Mar. Biol. 1971. V.9. P. 255–334. DOI: 10.1016/S0065-2881(08)60344-2

Ekman V. On the influence of the earth's rotation on ocean currents // Ark. Mat. Astron. Fys. 1905. V. 2. P. 1–53.

Fréon P., Barange M., Aristegui J. Eastern boundary upwelling ecosystems: integrative and comparative approaches // Prog. Oceanogr. 2009. V. 83. P. 1–14.

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 *Herbland A., Voituriez B.* La production primaire dans l'upwelling maur-itanien en mars 1973 // Cah. O.R.ST.OM., Sér. Océanogr. 1974. V. 12(3). P. 187–201.

Minas H.J., Codispoti L., Dugdale R. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa // Rapp. P-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer. 1982. V. 180. P. 148–183.

Polonskiy A.B., Serebrennikov A.N. Intensification of Eastern Boundary Upwelling Systems in the Atlantic and Pacific Oceans // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. V. 45. № 6. P. 422–429. DOI: 10.3103/S1068373920060059

Polonsky A.B., Serebrennikov A.N. Modifitsirovannaya metodika vychisleniya parametrov klimaticheskoy izmenchivosti apvellingov po termicheskomu indeksu [Modified method for calculating the parameters of climatic variability of upwellings by thermal index] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2021a. \mathbb{N}_2 1. P. 67–77. DOI: 10.31857/S0205961421010085 (In Russian).

Polonsky A.B., Serebrennikov A.N. Dolgoperiodnye tendentsii intensivnosti vostochnyh pogranichnyh apvelingovyh sistem po razlichnym sputnikovym dannym. Ch.1: Atlanticheskie apvellingi [Long-term tendencies of intensity of eastern coastal upwelling systems assessed using different satellite data on surface winds. Part 1: Atlantic Ocean] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2021b. № 5. C. 31–45. (In Russian).

Ross D.B., Cardone V.J., Overland J., McPherson R.D., Pierson W.J. Jr., Yu T. Oceanic surface winds // Adv. Geophys. 1985. V. 27. P. 101–138. DOI: 10.1016/S0065-2687(08)60404-5

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

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

Varela R., Álvarez I., Santos F. et al. Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982–2010? // Sci. Rep. 2015. V. 5. 10016. DOI: 10.1038/srep10016