

НИЗКОЧАСТОТНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЯ ВЕТРА, ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА В ОБЛАСТИ КАНАРСКОГО АПВЕЛЛИНГА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

А.Б. Полонский, А.Н. Серебренников

Институт природно-технических систем
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru; swsilv@gmail.com

Рассмотрены влияния долгопериодной изменчивости поля приводного ветра, а также геострофических течений на тренды температуры поверхности океана (ТПО) и термического индекса апвеллинга для района Канарского апвеллинга по спутниковым данным с 1980-х по 2016 гг. Несмотря на статистически значимую интенсификацию сгонного приводного ветра в регионе, не обнаружены долговременные тенденции в интенсивности апвеллинга (выраженной в терминах ТПО), а также в скорости геострофических течений. Делается вывод, что отсутствие значимой интенсификации Канарского апвеллинга при усилении сгонного ветра в регионе связано с общим ослаблением северо-восточного пассата из-за наблюдаемого глобального потепления.

Ключевые слова: интенсивность Канарского апвеллинга, термический индекс апвеллинга, приводный ветер, северо-восточный пассат, тренды.

Введение. Канарский апвеллинг представляет собой одну из крупнейших зон перманентного подъема вод, оказывающих существенное влияние на климат Земли. Вместе с тем, это один из наиболее продуктивных районов Мирового океана с уникальной морской экосистемой. Известно, что пограничные апвеллинговые экосистемы относятся к важнейшим районам международного рыболовства, обеспечивая более половины мировой добычи рыбы. Поэтому изучение закономерностей долгопериодной изменчивости интенсивности апвеллинга – одна из наиболее актуальных проблем современной физической океанологии [1, 2].

В работе [3] нами анализировалась температура поверхности океана (ТПО) в области Канарского апвеллинга, ограниченной координатами $10^{\circ} - 30^{\circ}$ с.ш. и $10^{\circ} - 20^{\circ}$ з.д. Было показано, что с 1982 по 2015 гг. в этой области северо-восточной части Тропической Атлантики произошло повышение ТПО в среднем на 1°C . Был сделан вывод, что около половины повышения ТПО в зоне Канарского апвеллинга вызвано глобальным потеплением, а вторая половина – ослаблением апвеллинга, возможно связанное с ослаблением северо-восточного пассата. Вместе с тем, спутниковые дан-

ные показывают, что скорость приводного ветра в исследуемом районе не уменьшается. Напротив, с конца 1990-х годов к 2016 г. ветер усилился приблизительно на $0,5$ м/с (рис. 1). В настоящей работе мы проанализируем низкочастотную изменчивость приводного ветра, геострофических течений и ТПО в зоне Канарского апвеллинга, что позволит уточнить выводы работы [3].

Характеристика использованных данных и методика их обработки. Карты ТПО за 35-летний период – с 1982 по 2016 гг. были получены с сайта NASA PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center): <https://podaac.jpl.nasa.gov/>. Данные обработаны в Национальном центре климатических данных NOAA (NOAA National Climatic Data Center) до так называемого четвертого уровня (Level 4) обработки, т.е., первичные данные прошли контроль качества, коррекцию и были проинтерполированы в узлы регулярной сетки. Причем, в качестве исходных данных для оптимальной интерполяции использовались ночные и дневные измерения радиометра Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) с 4-километровым разрешением, а также корабельные и буйковые наблюдения in situ. Радиометры AVHRR устанавлива-

лись на спутники серии NOAA (NOAA 7 – NOAA 19) и серии MetOp. Векторные карты приводного ветра за 29-летний период (с 1988 по 2016 гг.) были получены с сайта NCEP (National Centers for Environmental Prediction): <http://www.ncep.noaa.gov/>. Карты географической скорости в виде двухком-

понентных векторов за 23-летний период (с 1993 по 2015 гг.) были получены с сайта Aviso: <http://www.aviso.altimetry.fr>. Все перечисленные карты имеют пространственное разрешение $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, временное – 1 сутки и покрывают всю поверхность Земли.

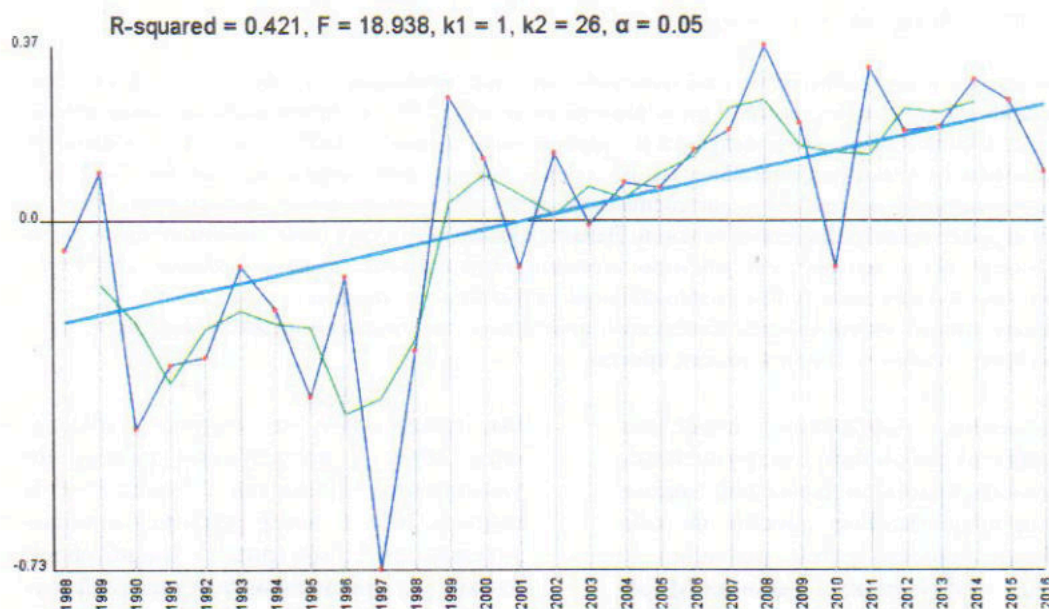


Рис. 1. Временная изменчивость аномалий среднегодовой скорости приводного ветра (м/с), усредненная по всей области Канарского архипелага ($10^\circ - 30^\circ$ с.ш. и $10^\circ - 20^\circ$ з.д.). Зеленым показан временной ход скорости ветра, сглаженной по 4-летним отрезкам, голубым – линейный тренд с коэффициентом детерминации R^2 (R-squared) и критерием Фишера (F)

Для исключения влияния глобального потепления на изменение ТПО в зоне архипелага был рассчитан термический индекс архипелага (ТИА), представляющий собой разность между ТПО в архипелаговой зоне и ТПО на расстоянии примерно 500 км от берега на той же широте [4]. Первоначально для вычисления ТИА нами был выбран участок акватории с координатами $10^\circ - 30^\circ$ с.ш. и $24^\circ - 26,5^\circ$ з.д. (на рис. 2 он обозначен как "ТИА 1"). В настоящей работе для более надежного расчета ТИА нами была выбрана большая область (регион RI) с координатами $14^\circ - 26^\circ$ с.ш. и $20^\circ - 30^\circ$ з.д. (рис. 2). В 10 градусах по долготу укладываются 40 точек, по которым было рассчитано среднее значение температуры для каждого ряда по широте. Это

среднее, свое для каждой широты, вычиталось из ТПО архипелаговой зоны. В результате были получены ряды ТИА, менее зашумленные, чем в работе [3]. Для выявления долговременных тенденций в исследуемых полях рассчитывались линейные тренды с оценкой статистической значимости. В дальнейшем на рисунках число степеней свободы, необходимых для применения статистического F-критерия Фишера, обозначено переменными k_1 и k_2 . Кроме этого, необходимо использовать табличное значение F_{crit} , которое выбирается при данных степенях свободы и уровне значимости α . Уровень значимости α – вероятность отвергнуть первоначальную («нулевую») гипотезу при условии, что она верна.

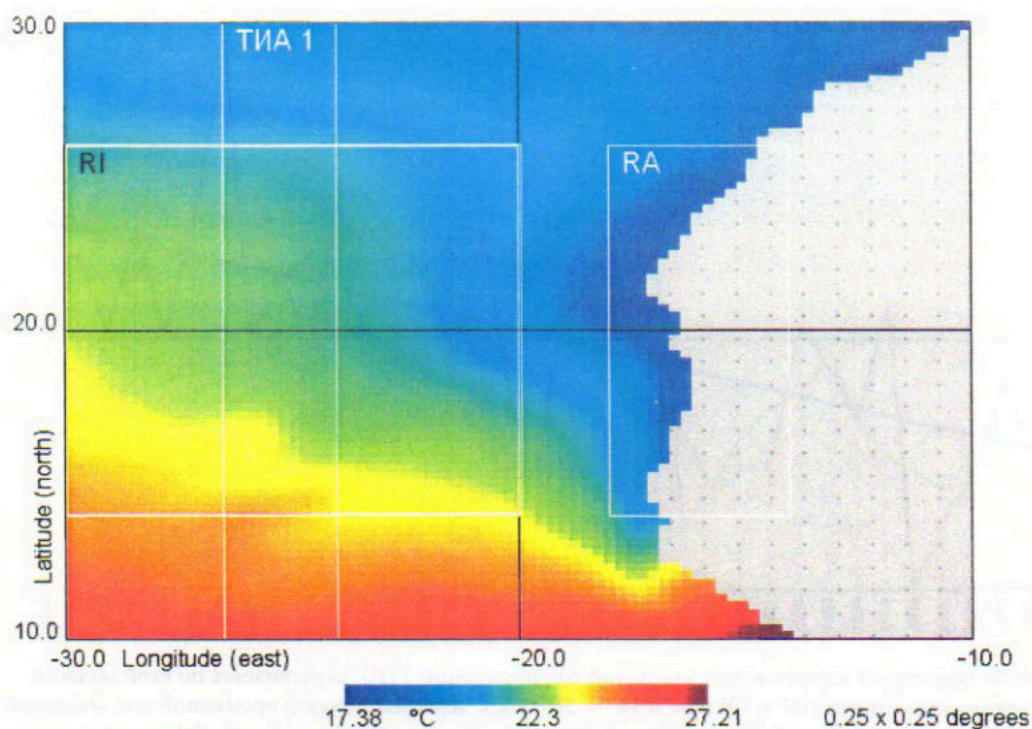


Рис. 2. Среднеклиматическая ТПО за январь. Белыми прямоугольниками показаны первоначальная область для расчета ТИА (ТИА 1), новая область (RI) и исследуемый регион RA

Обычно выдвигается нулевая гипотеза о том, что линейный тренд статистически незначим на уровне значимости α . Если фактическое значение F-критерия меньше табличного, то нет основания для отклонения нулевой гипотезы. В противном случае, нулевая гипотеза отклоняется и с вероятностью $(1-\alpha)$ принимается альтернативная гипотеза о статистической значимости линейного тренда.

Результаты. Вывод в работе [3] об ослаблении апвеллинга примерно на $0,5^\circ\text{C}$ (в терминах ТПО) был сделан для небольшой области, ограниченной координатами $22^\circ - 23^\circ$ с.ш. и $18^\circ - 17^\circ$ з.д. Если рассматривать всю область Канарского апвеллинга, ограниченную координатами $10^\circ - 30^\circ$ с.ш. и $10^\circ - 20^\circ$ з.д., то при общем повышении ТПО примерно на 1°C (рис. 3), говорить о значимом повышении среднегодовой температуры из-за ослабления апвеллинга в целом мы не можем. Скорее мы наблюдаем квазипериодическое усиление и ослабление

апвеллинга с амплитудой примерно $0,1^\circ$ (рисунок не представлен).

Для графиков на рис. 1 и 3 найденные оценки линейных трендов статистически надежны, т.к. фактические значения F-критериев больше табличных значений.

Известно, что область Канарского апвеллинга по характеру сезонных колебаний, связанных с изменением интенсивности и пространственными смещениями северо-восточного пассата, можно приблизительно разделить на три зоны: $10^\circ - 20^\circ$ с.ш. – зона значительных сезонных колебаний; $20^\circ - 25^\circ$ с.ш. – зона сильных колебаний; $25^\circ - 30^\circ$ с.ш. – зона умеренных колебаний [5]. Для исследования трендов в настоящей работе мы выбрали регион RA, ограниченный координатами $14^\circ - 26^\circ$ с.ш. и $18^\circ - 14^\circ$ з.д., рекомендуемый, как зона с максимальной интенсивностью апвеллинга [6] (рис. 2, 4). При пространственном разрешении $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ в регионе RA помещается 768 точек, из которых почти половина приходится на берег.

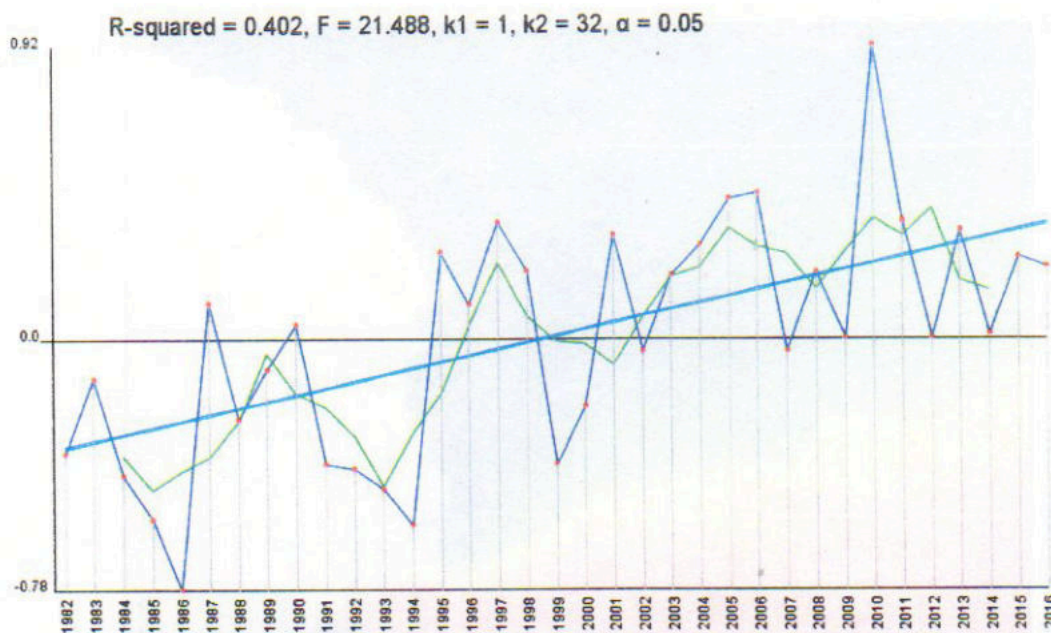


Рис. 3. Временная изменчивость аномалий среднегодовой ТПО, осредненная по всей области Канарского апвеллинга ($10^{\circ} - 30^{\circ}$ с.ш. и $10^{\circ} - 20^{\circ}$ з.д.). Зеленым показан временной ход аномалий ТПО, сглаженный по 4-летним отрезкам, голубым – линейный тренд с коэффициентом детерминации R^2 (R-squared) и критерием Фишера (F)

Типичное среднегодовое поле ветра, построенное для неаномального года и представленное на рис. 4, показывает, что пространственная структура зональной и меридиональной компонент среднегодового ветра однотипна. Корреляционная связь между меридиональной и зональной компонентами среднегодового вектора ветра статистически значима на 0,1% уровне. Это позволило нам анализировать только одну из компонент среднегодового приводного ветра. На рис. 4 также хорошо видно, что сгонные северо-восточные ветра в среднем за год преобладают в зоне $15^{\circ} - 30^{\circ}$ с.ш. Южнее 15° с.ш. характерны среднегодовые ветра юго-западного направления. Другими словами, апвеллинг здесь носит сезонный характер и развивается зимой при смещении внутритропической зоны конвергенции к югу Северного полушария, что подтверждает ранее опубликованные результаты [7].

В исследуемом регионе RA за 35 лет (1982 – 2016 гг.) тренд среднегодовой ТПО показал, что ТПО выросла примерно на 1°C (рисунок не приведен). Найденная оценка линейного тренда статистически надежна согласно расчи-

танному F-критерию Фишера. Временной ход ТИА указывает на отсутствие тренда и наличие квазипериодического усиления и ослабления апвеллинга с приблизительно 15-летним периодом и амплитудой около $0,1^{\circ}\text{C}$ (рис. 5).

Рассмотрим возможные причины такого результата. В процессе глобального потепления вероятны две противоположные тенденции в поле ветра. С одной стороны, из-за ослабления разности температуры и давления между высокими и низкими широтами должно происходить ослабление зональной циркуляции (в первую очередь, северо-восточных пассатов). С другой стороны, должно наблюдаться усиление прибрежного ветра в области Канарского апвеллинга из-за увеличения термических контрастов между материком и океаном [3, 7]. Последняя тенденция подтверждается нашими результатами. Согласно рассчитанному F-критерию Фишера найденная оценка величины линейного тренда модуля вектора ветра статистически значима. Однако линейное уравнение регрессии явно не является оптимальной аппроксимацией временного хода скорости приводного ветра.

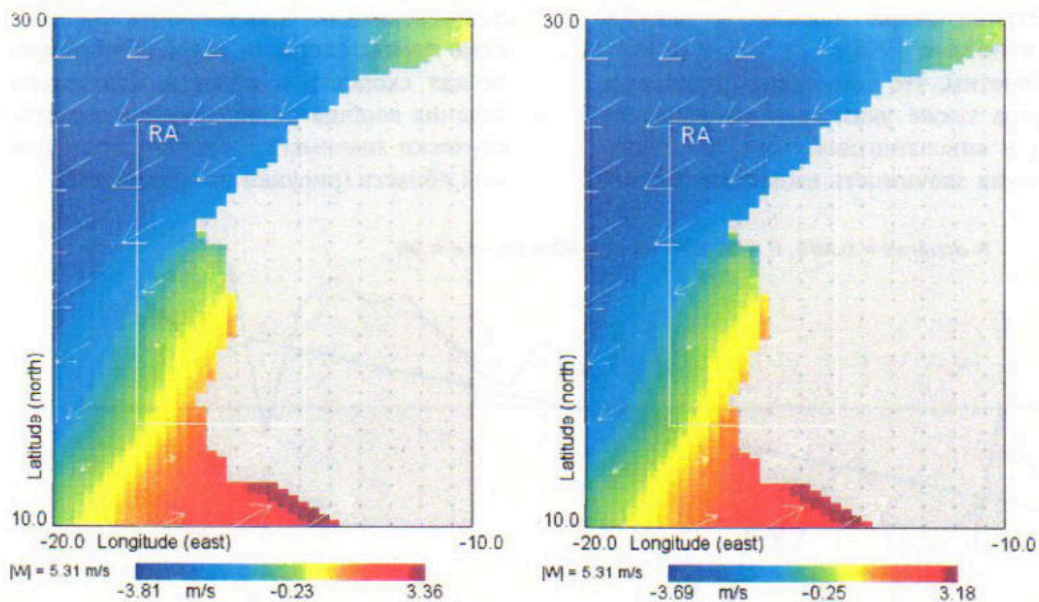


Рис. 4. Вектора среднегодового ветра за 2003 г. (показаны стрелками) на фоне осредненных значений зональной (слева) и меридиональной (справа) компонент приводного ветра (цветная палитра). Прямоугольники белого цвета – исследуемый регион RA (14° – 26° с.ш. и 18° – 14° з.д.)

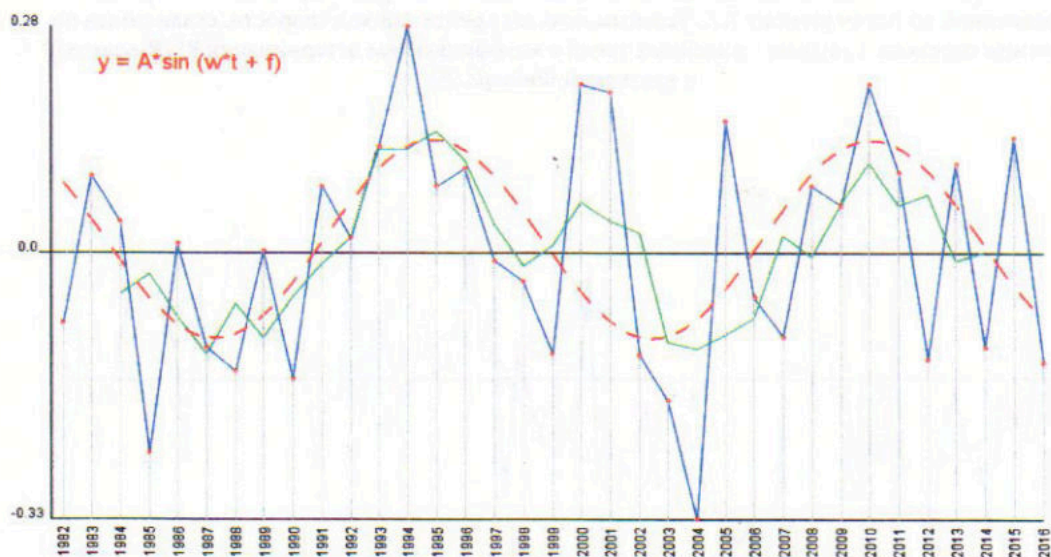


Рис. 5. Временная изменчивость аномалий среднегодового ТИА, осредненных по всему региону RA. Зеленым показан временной ход аномалий ТПО, сглаженный по 5-летним отрезкам. Красным пунктиром показана периодическая (синусоидальная с периодом 15 лет) аппроксимация

Действительно, главная особенность долговременной изменчивости скорости ветра заключается в том, что за 29 лет (с 1988 по 2016 гг.) один раз наблюдался скачкообразный рост модуля вектора, который составил около 0,6 м/с. Это произошло в 1997-1998 гг., т.е. в период развития и последующей релаксации

исключительно интенсивного Эль-Ниньо. При этом отклонение среднегодовой скорости приводного ветра от климатической нормы вначале составило -0,4 м/с, а в следующем году - 0,2 м/с (рис. 6). На более подробном графике (рис. 7) среднемесячной скорости приводного ветра видно, что аномальное

ослабление ветра длилось с декабря 1996 г. по март 1998 г.

Отметим, что компоненты приводного ветра также указывают на усиление ветра в апвеллинговой зоне, но статистическая значимость выделенных трен-

дов невелика по сравнению со значимостью тренда скорости ветра. Геострофическая скорость в области Канарского течения вообще не обнаруживает статистически значимых трендов в исследуемой области (рисунки не приведены).

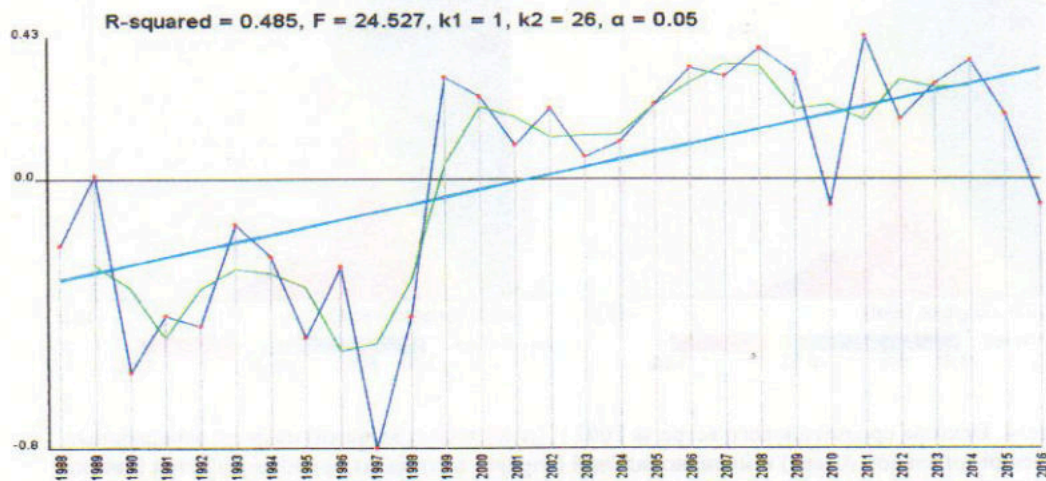


Рис. 6. Временная изменчивость аномалий среднегодовой скорости приводного ветра (м/с), осредненной по всему региону RA. Зеленым показан временной ход скорости, сглаженный по 4-летним отрезкам, голубым – линейный тренд с коэффициентом детерминации R^2 (R-squared) и критерием Фишера (F)

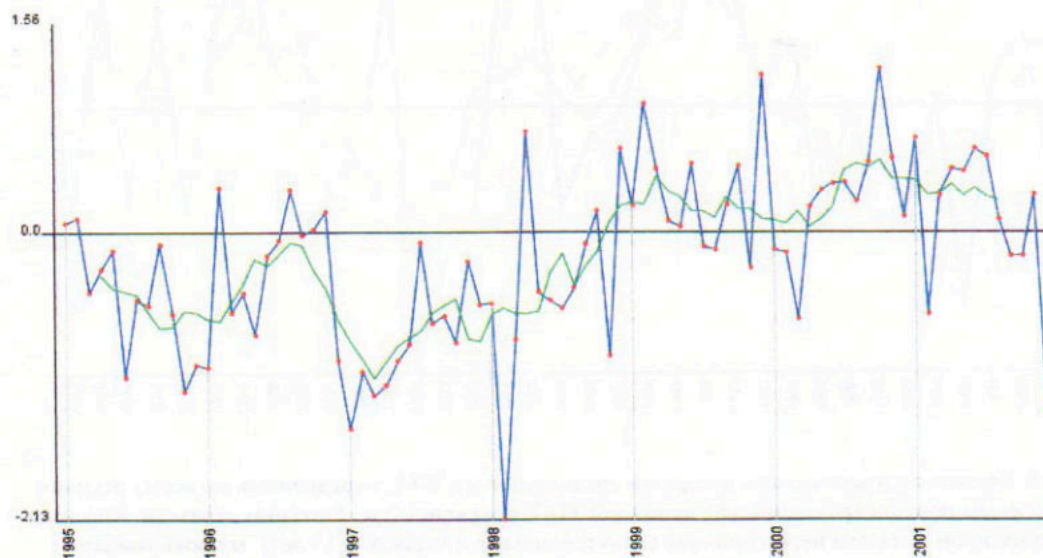


Рис. 7. Временная изменчивость аномалий среднемесячного модуля приводного ветра (м/с), осредненная по всему региону RA за период с 1995 по 2001 гг. Зеленым показан временной ход, сглаженный по 8-летним отрезкам

Обсуждение и выводы. Исследования доступных полей ТПО, приводного ветра и геострофической скорости по спутниковым данным в регионе Канар-

ского апвеллинга с 1980-х годов показали, что:

– за 35 лет среднегодовая ТПО выросла в среднем по региону на 1°C ;

– после резкого ослабления в 1997 г., т.е. после начала самого интенсивного за последнее столетие Эль-Ниньо, среднегодовая скорость приводного ветра от климатической нормы в целом в рассматриваемом регионе скачкообразно выросла примерно на 0,6 м/с. Таким образом, ослабление пассатов в восточной части Тихого океана и последующая их интенсификация сопровождались соответствующими изменениями интенсивности северо-восточного пассата в Тропической Атлантике;

– в исследуемом регионе (РА) наблюдались квазипериодические изменения ТИА с амплитудой примерно 0,1° и 15-летним периодом. Эти результаты хорошо согласуются с известным фактом о наличии квазипериодической изменчивости ТПО на акватории Атлантики с периодами от 10 до 20 лет [8].

В итоге не было обнаружено статистически значимого влияния долгопериодного изменения скорости приводного ветра в регионе на ТИА в области Канарского апвеллинга. Вероятная причина этого заключается в наличии двух противоположных тенденций в поле ветра. Первая из них заключается в ослаблении северо-восточного пассата, вторая – в усилении сгонного прибрежного ветра в области апвеллинга. Обе тенденции являются следствием глобального потепления. На долгопериодные тренды накладываются высокоамплитудные вариации межгодового-десятилетнего масштаба, затрудняющих выделение трендовой компоненты изменчивости.

Предположение о квазистационарном характере апвеллинга на шельфе Канарского побережья было подтверждено в работе [9]. Вместе с тем, авторы этой работы сделали вывод, что использование ТИА в качестве индикатора интенсивности подъема вод в районе Канарского побережья представляется проблематичным, в связи со сложной структурой гидродинамических процессов в зоне апвеллинга.

Авторы статьи [10] утверждают, что опубликованные результаты, касающиеся трендов температуры в области ап-

веллинга, расположенного вдоль Канарского побережья, являются спорными. Другие опубликованные работы подтверждают этот вывод. Действительно, используя базу данных NCEP / NCAR, группа авторов [11] выделила положительный тренд в интенсивности апвеллинга на 22° – 33° с.ш. за период с 1982 по 2010 гг. для весны и лета. Противоположные результаты с использованием той же базы данных были приведены в работе [7].

В ряде работ был сделан вывод, что линейные тренды ТПО в области апвеллинга вдоль Канарского побережья в значительной степени зависят от длины анализируемого временного ряда, выбранной области и рассматриваемого сезона, поскольку наблюдается значительная пространственно-временная изменчивость в поле ветра, в том числе десятилетнего масштаба [10, 12]. В частности, по данным океанического реанализа ORA-S3 авторами работы [12] было показано, что в 1959 – 2011 гг. в целом происходило ослабление апвеллинга, которое было немонотонным. Оно явилось следствием общего ослабления пассатной циркуляции в северной части Тропической Атлантики. Фактически, этот результат подтверждает данные, опубликованные нами в работе [3], которые уточнены в настоящем исследовании.

Основной вывод настоящей работы о причинах наблюдаемых тенденций в поле ТПО в области Канарского апвеллинга подтверждается также последними оценками долгопериодных трендов в поле ветра, представленными в работе [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mittelstaedt E.* The upwelling area off northwest Africa a description of phenomena related to coastal upwelling // *Prog. Oceanog.* 1983. Vol. 12. P. 307–331.
2. *Upwelling: Mechanisms, Ecological Effects and Threats to Biodiversity* (Editors: Williams E. Fischer and Adams B.

Green). Nova Science Publishers, Inc., New York, USA, 2013. P. 98.

3. Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Что происходит с температурой поверхности океана в зоне Канарского апвеллинга в условиях меняющегося климата? // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2016. Вып. 4 (24). С. 75–78.

4. Lachkar Z., Gruber N. A comparative study of biological production in eastern boundary upwelling systems using an artificial neural network. *Biogeosciences*, 9, 2012, 293–308

5. Valdes L., Deniz-Gonzalez I. Oceanographic and biological features in the Canary Current Large Marine Ecosystem. IOC-UNESCO, Paris. IOC Technical Series, No. 115: 383 PP., 2015.

6. Лобанова П.В., Башмачников И.Л., Бротаиш В. Анализ моделей первичной продукции на основе спутниковых данных в северо-восточной части Атлантического океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 114–126.

7. Barton E.D., Field D.B., Roy C. Canary Current upwelling: more or less? // *Progress in Oceanography*. September 2013. Vol. 116. P. 167–178.

8. Полонский А.Б. Роль океана в изменениях климата. Киев: Наукова Думка, 2008. 142 с.

9. Зависимость фитопланктона от состояния Канарского апвеллинга в прибрежных районах Исламской Республики Мавритании и Республики Сенегал / С.Н. Семенова, С.К. Кудерский, В.И. Архипов [и др.] // XVI Конф. по промышленной океанологии. Калининград: Изд. АтлантНИРО. 2014. 178 с.

10. Varela R., Alvarez I., Santos F., deCastro M., Gomez-Gesteira M. Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982–2010? // *Scientific Reports* 5, Article number: 10016. 2015.

11. Santos F., deCastro M., Gomez-Gesteira M., Alvarez I. Differences in coastal and oceanic SST warming rates along the Canary upwelling ecosystem from 1982 to 2010 // *Cont. Shelf Res.* 47, 1–6. 2012.

12. Полонский А.Б., Сухонос П.А. Оценка составляющих теплового баланса верхнего квазигомогенного слоя в Северной Атлантике // *Изв. РАН, сер. ФАО*, 2016. Т. 52. № 6. С. 729–739.

13. Desbiolles F., Bentamy A., Blanke B., Roy C., Mestas-Nuñez A. M., Grodsky S.A., Herbette S., Cambon G., Maes C. Twodecades [1992–2012] of surface wind analyses based on satellites catterometer observations. *J. Marine System*, 2017, dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.01.003.

LOW-FREQUENCY VARIABILITY OF THE WIND FIELD, GEOSTROPHIC VELOCITIES AND OCEAN SURFACE TEMPERATURE IN CANARY UPWELLING ACCORDING TO SATELLITE DATA

A.B. Polonsky, A.N. Serebrennikov

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

The effect of long-period variability of the speed and direction of sea surface winds, absolute geostrophic velocities on the sea surface temperature (SST) and thermal upwelling index (TUI) trends in the Canary upwelling region is considered using satellite data from 1980 to 2016. Despite the statistically significant intensification of the surface wind in the region, there were no long-term trends in the upwelling intensity (expressed in SST terms), as well as in the geostrophic velocities. It is concluded that the absence of a significant intensification of the Canary upwelling with the increase of the drift wind in the region is associated with a general weakening of the northeast trade wind due to the observed global warming.

Keywords: Canary upwelling intensity, thermal upwelling index, surface wind, northeast trade wind, trends.