# ЭЛЬ-НИНЬО 2015-2016 ГГ.: ЭВОЛЮЦИЯ, МЕХАНИЗМЫ, СОПУТСТВУЮЩИЕ УДАЛЕННЫЕ АНОМАЛИИ

А.М. Осипов, Д.Ю. Гущина

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Кафедра метеорологии и климатологии, Россия, 119991, Москва, Ленинские Горы, ГСП-1; sashaosipov@list.ru

Реферат. Проведен комплексный анализ явления Эль-Ниньо 2015-2016 гг. Изучена эволюция состояния атмосферы и океана в период зарождения, развития, кульминации и затухания Эль-Ниньо 2015-2016 гг., особое внимание уделено аномалиям атмосферной циркуляции в вертикальной плоскости (ячейки циркуляции Уокера и Хэдли). Проведено сравнение эволюции характеристик атмосферы и океана в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. с композиционными схемами для канонического и Модоки Эль-Ниньо. Сравнение показало, что Эль-Ниньо 2015-2016 гг. может быть отнесено к каноническому типу, однако с рядом черт, присущих типу Модоки на стадии затухания. Проанализированы механизмы генерации одного из мощнейших в истории наблюдений явления Эль-Ниньо. Показано, что особый вклад в формирование положительной аномалии температуры поверхности океана внесли всплески западных ветров, вызванные колебаниями внутрисезонного масштаба в атмосфере: колебаниями Маддена-Джулиана и экваториальными волнами Россби. Показано, что в 2014 г. Эль-Ниньо начало формироваться, но не развилось в полноценное явление в результате ослабления колебаний Маддена-Джулиана и волн Россби в середине 2014 г. Выделены особенности сопутствующих удаленных аномалий для Эль-Ниньо 2015-2016 гг. в полях приземной температуры воздуха и атмосферных осадков, определены регионы, где влияние Эль-Ниньо оказалось наиболее сильным.

**Ключевые слова.** Эль-Ниньо, внутрисезонная тропическая изменчивость, вертикальные ячейки циркуляции, сопутствующие удаленные аномалии.

# EL NIÑO 2015/2016: EVOLUTION, MECHANISMS, AND CONCOMITANT REMOTE ANOMALIES

A.M. Osipov, D.Yu. Gushchina

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology & Climatology, GSP-1, Leninskiye Gory, 119991, Moscow, Russia; sashaosipov@list.ru

**Abstract.** El Niño 2015/16 is analyzed comprehensively. The evolution of atmospheric and oceanic characteristics during different phases of this El Niño is documented with emphasis on vertical atmospheric circulation anomalies (Hadley and Walker cells). Evolution of atmospheric and oceanic parameters is compared

with composites of canonical and Modoki El Niño. El Niño 2015/16 is identified as canonic with some Modoki features at mature phase. The generation mechanisms of one of the strongest El Niños are analyzed. The role of westerly wind burst in generation of positive sea surface temperature anomaly is highlighted. These westerly winds were generated by intraseasonal atmospheric disturbances (Madden-Julian Oscillation and equatorial Rossby waves). The difference between conditions in 2014 (when El Niño started to form but suddenly disappeared) and in 2015 (when a strong El Niño developed) is detected. Concomitant anomalies of the near-surface temperature and precipitation regimes are studied, and regions the most affected by El Niño 2015/16 are identified.

**Keywords:** El Niño, within-season tropical variability, vertical circulation cells, concomitant remote anomalies.

### Введение

Явление Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК) – наиболее интенсивная мода межгодовой изменчивости в тропиках.

За счет механизма дальних связей Эль-Ниньо может оказывать влияние на многие районы Земного шара, определяя особенности погодных режимов (Trenberth, 1998; Железнова и Гущина, 2015, 2016, 2017), что может приводить к ущербу в экономике многих государств и даже к человеческим жертвам. Особой проблемой является непериодичность и нерегулярность ЭНЮК: вслед за явлением Эль-Ниньо может наступить как Ла-Нинья, так и нейтральная фаза (Петросянц и Гущина, 2002). Иногда отмечается наступление двух явлений Эль-Ниньо подряд. Изучение особенностей формирования Эль-Ниньо и сопутствующих удаленных аномалий позволит в дальнейшем увеличить точность прогнозирования данного явления и минимизировать его негативные последствия.

Эль-Ниньо могут быть настолько непохожими друг на друга, что в последнее время специалисты начали выделять два типа данного явления. В основу разделения Эль-Ниньо на два типа положена локализация максимума аномалии температуры поверхности океана (ТПО). К каноническому типу относят Эль-Ниньо, при которых очаг аномально теплых вод тяготеет к восточной части тропического Тихого океана. При Эль-Ниньо Модоки аномально теплые поверхностные воды находятся в центральной части Тихого океана, в то время как в его западной и восточной части формируются отрицательные аномалии ТПО (Ashok et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Kug et al., 2010).

В 2015-2016 гг. состоялось одно из сильнейших в истории наблюдений явление Эль-Ниньо, по своей амплитуде сравнимое с мощными Эль-Ниньо 1982-1983 гг. и 1997-1998 гг. (https://www.climate.gov/news-features/blogs/ enso/april-2016-el-niñola-niña-update-what-goes-...). Значение индекса ONI (Oceanic Niño Index), рассчитываемого как скользящее среднее значение аномалии ТПО за три последовательных месяца в регионе Niño 3.4 (5°с.ш. – 5°ю.ш., 120°з.д. – 170°з.д.), достигло в ноябре 2015 г. – январе 2016 г. 2.6°С. В ноябре 2015 г. аномалии ТПО в регионе Niño 3.4 превысили 2.5°С, что превышает аналогичные показатели 1997 г. и 1982 г. (Jiménez-Muñoz et al., 2016).

В силу исключительной интенсивности данного явления и возникшей в последние десятилетия возможности осуществления непрерывного всестороннего мониторинга с использованием спутниковой информации Эль-Ниньо 2015-2016 гг. вызвало особое внимание со стороны исследователей. В частности, в работах (Хие, Kumar, 2016; L'Heureux et al, 2016) был проведен анализ эволюции характеристик атмосферы и океана в период данного явления в сравнении с условиями двух сильнейших в истории наблюдений Эль-Ниньо 1982-1983 гг. и 1997-1998 гг. Сравнение условий в период Эль-Ниньо 1997-1998 гг. и 2015-2016 гг. также было проведено в работе (Paek et al., 2017).

В предыдущих исследованиях относительно мало внимания уделялось атмосферной циркуляции, в особенности аномалиям вертикальных ячеек циркуляции, в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. Анализ сопутствующих удаленных аномалий проводился только для отдельных регионов (Jacox et. al., 2016; Thirumalai et. al., 2017).

Значительное число работ посвящено анализу механизмов формирования Эль-Ниньо 2015-2016 гг. В ряде исследований показано, что важную роль в процессе формирования Эль-Ниньо 2015-2016 гг. сыграл всплеск западных ветров, который привел к распространению теплых вод в центральную и восточную часть тихоокеанского бассейна (Levine and McPhaden, 2016; Hu and Fedorov, 2017; Puy et. al, 2017). В работе (Hu and Fedorov, 2017) также особый акцент сделан на том, что в 2014 г., когда отмечались предпосылки для развития Эль-Ниньо, данное явление не развилось именно из-за того, что начальный всплеск западных ветров был прерван усилением пассатов, и положительная аномалия ТПО быстро затухла. В 2015 г. отмечалось несколько всплесков западных ветров, что привело к развитию положительной аномалии ТПО в восточной части тихоокеанского бассейна. В работе (Chen et al., 2016) показано, что развитие мощнейшего Эль-Ниньо в 2015-2016 гг. связано с распространением на восток океанических волн Кельвина, вызванных всплесками западных ветров. Авторы предположили, что эти западные аномалии ветра обусловлены изменчивостью АО (Арктической осцилляции) и МЈО (колебаний Маддена-Джулиана). В исследовании (Levine and McPhaden, 2016) подчеркивалось, что Эль-Ниньо 2015 г. оказалось настолько сильным потому, что развивалось в условиях изначально прогретого океана, которые были вызваны «неудавшимся» Эль-Ниньо в предшествующем году.

Недавние исследования показали, что атмосферные возмущения внутрисезонного масштаба (ВТИ – для внутрисезонной тропической изменчивости), а именно колебания Маддена-Джулиана (МЈО) и конвективно связанные экваториальные волны Россби, играют важную роль в механизме генерации Эль-Ниньо (McPhaden et al., 2006, Hendon et al., 2007; Gushchina and Dewitte 2012). Они способны генерировать всплески восточных и западных ветров в тропической атмосфере (Puy et. al., 2016). Последние особенно важны с точки зрения формирования Эль-Ниньо, так как генерируют в океане распространяющуюся на восток волну Кельвина, способствующую распространению на восток аномалии глубины залегания термоклина, ответственной за рост ТПО у побережья Южной Америки и формирование условий Эль-Ниньо (Gushchina and Dewitte, 2011, 2012). В данной работе проведен анализ стохастического воздействия атмосферы на формирование одного из мощнейших явлений Эль-Ниньо в истории наблюдений.

Эль-Ниньо 2015-2016 гг. вызвало аномалии температуры и осадков во многих регионах Земного шара. В период развития, кульминации и затухания Эль-Ниньо 2015-2016 гг. отмечался ряд серьезнейших погодных аномалий. Среди них можно выделить катастрофические наводнения в Южной Америке и Китае, засухи в южной Африке и Австралии.

При анализе сопутствующих аномалий для наблюдавшегося ранее Эль-Ниньо (Mo, 2010; Yuan and Yang, 2012; Yu et al., 2012) акцент был сделан на региональных исследованиях.

Цель данной работы – комплексный анализ эволюции характеристик атмосферы и океана в период зарождения, развития, кульминации и затухания Эль-Ниньо 2015-2016 гг. с акцентом на анализе изменений структуры вертикальных ячеек циркуляции, а также определение особенностей сопутствующих удаленных аномалий в полях температуры и осадков для данного явления. Особое внимание уделено определению типа Эль-Ниньо 2015-2016 гг., поскольку эволюция аномалий ТПО не позволила однозначно определить, к какому из двух типов (каноническому или Модоки) относилось данное явление.

## Данные и методика

В работе использованы среднемесячные данные реанализа EraInterim о зональной и меридиональной компонентах скорости ветра, аналоге вертикальной скорости ветра и приземной температуре воздуха. Данные о количестве осадков взяты из архива Global Precipitation from satellite and gauge measurements (GPCP). Данные о температуре поверхности океана из архива Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v4.

Для анализа эволюции аномалий в океане использовались данные реанализа GODAS (Global Ocean Data Assimilation System) о ежемесячных значениях толщины перемешанного слоя океана и потенциальной температуры верхнего 300-метрового слоя океана.

Для исследования океанической волны Кельвина (АКМ) были использованы данные об уровне океана, спроецированном на меридиональную структуру внутрисезонной океанической волны Кельвина (описание методики см. ниже), предоставленные Борисом Девиттом (Boris Dewitte, Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale, France) за период 2000-2015 гг.

Анализ вертикальных ячеек осуществлялся на основе метода, предложенного Вангом (Wang, 2002). В качестве горизонтальной составляющей циркуляции использована дивергентная часть зональной и меридиональной компонент ветра, представляющая собой градиент потенциала скорости дивергентного ветра (ПСДВ). В качестве вертикальной составляющей использован аналог вертикальной скорости. Исходные данные об аналоге вертикальной скорости и рассчитанные ряды зональной и меридиональной составляющей дивергентного ветра представлены с шагом по высоте, равным 50 гПа.

Графическое представление ячеек построено на основе данных о зональной компоненте дивергентного ветра и аналоге вертикальной скорости для ячейки Уокера и данных о меридиональной компоненте дивергентного ветра и аналоге вертикальной скорости для ячейки Хэдли. Ввиду несоответствия порядков значений дивергентного ветра и аналога вертикальной скорости, последние умножались на 100. Также для наглядности интерпретации значения аналога вертикальной скорости брались с обратным знаком (в исходном виде он положителен при нисходящих движениях и отрицателен при восходящих).

Вертикальные ячейки циркуляции представлены не в терминах абсолютных значений компонент дивергентного ветра и аналога вертикальной скорости, а в терминах аномалий данных характеристик относительно среднего годового хода за период с 1979 г. по 2014 г. Ячейки Хэдли были построены для тропической зоны (от 40° с. ш. до 40° ю. ш.), разделенной на 9 секторов по 40° долготы. Для построения ячейки Уокера проводилось осреднение данных вдоль экватора от 5° с. ш. до 5° ю. ш.

Выделение компонент ВТИ (колебаний Маддена-Джулиана и конвективно связанных экваториальных волн Россби) осуществлялось на основе двумерного спектрального анализа. В соответствии с методикой, описанной в (Wheeler and Kiladis, 1999), исходные поля скорости ветра были разделены на симметричную и асимметричную относительно экватора компоненты, так как существуют экваториальные волны симметричные и асимметричные относительно экватора. Для каждой компоненты проведено прямое преобразование Фурье и построен двумерный спектр в пространстве зональное волновое число – частота. В полученном спектре выделены максимумы, соответствующие определенным типам ВТИ (путем сопоставления с дисперсионными кривыми конкретных волн). Для МЈО, не имеющей дисперсионного соотношения и не являющегося волной, использованы характерные пространственно-временные масштабы этого колебания (время существования одного колебания составляет 30-60 суток, пространственный масштаб – 6-20 тыс. км, скорость распространения – 5 м/с). На следующем этапе проведено обратное преобразование Фурье с сохранением спектральных коэффициентов в области, соотколебанию, ветствующей конкретному И восстановлен сигнал, соответствующий волне Россби или МЈО.

Интенсивность компонент ВТИ рассчитывалась как среднеквадратичное отклонение (СКО) по скользящему периоду со сдвигом в один день. Длина периода зависит от типа волны: для МЈО – 90 дней, для волн Россби – 48 дней.

Метод выделения океанических волн Кельвина аналогичен описанному в работе (Dewitte et al., 2008). Аномалии уровня океана проецируются на первые две бароклинные моды вертикального распределения плотности в океане. Полученные для каждой моды пространственные поля проецируются на функцию меридионального распределения, соответствующего волне Кельвина. Последние были получены для средней вертикальной стратификации, рассчитанной в каждой точке сетки по долготе для каждого шага по времени с применением низкочастотного фильтра (7 лет). Данный метод позволяет выделить волну Кельвина внутрисезонного масштаба, однако отфильтрованный сигнал включает в себя дисперсионный эффект, связанный с пространственным (зональным) и временным (низкочастотным) изменением стратификации.

Далее были рассчитаны 5-дневные аномалии по отношению к скользящему месячному среднему значению. Исходный временной ряд содержит осредненные по пятидневкам значения уровня океана. Из этого ряда вычитаются средние месячные значения уровня океана, интерполированные на 5дневный масштаб с помощью сплайн-функции, что позволяет получить аномалии с временным разрешением 5 дней. Данный метод использовался, в частности, в работе (Dewitte et al., 2012) для анализа океанических волн Кельвина внутрисезонного масштаба.

## Результаты

### Эволюция состояния атмосферы и океана

На первом этапе рассмотрена эволюция аномалий в океане и атмосфере в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. На рис. 1 представлена эволюция аномалий ТПО и ветра в нижней тропосфере (850 гПа) в период развития, кульминации и затухания Эль-Ниньо (декабрь 2015 г. – февраль 2016 г.).

Следует отметить, что еще до начала развития Эль-Ниньо в 2015 г. тропический Тихий океан уже был аномально прогретым, что связано с положительной фазой Тихоокеанского декадного колебания (PDO – Pacific Decadal Oscillation), при котором отмечается повышение температуры поверхности восточной части Тихого океана в Северном полушарии (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/ GODAS/ocean\_briefing.shtml). Также положительная аномалия TПО была обусловлена неразвившимся Эль-Ниньо 2014 г., которое, тем не менее, способствовало прогреву Тихого океана. Об этом свидетельствуют, например, положительные значения индекса Niño3.4, сохранявшиеся начиная с апреля 2014 г. (www.esrl.noaa.gov/psd/gcos wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.anom.data).

Положительная аномалия ТПО сформировалась в восточной части Тихого океана в июне-августе 2015 г. (рис. 1а) и достигла своего максимума в период кульминации Эль-Ниньо (рис. 1д). Так называемый «теплый язык» сохранялся вплоть до марта-мая 2016 г. (рис. 1ж), однако максимум интенсивности аномалии температуры поверхности океана (АТПО) постепенно смещался от побережья Южной Америки к западу. В регионе Niño3.4 значения АТПО достигли рекордных 2.3°С, что прежде отмечалось только во время Эль-Ниньо 1997-1998 гг. В целом максимум положительной аномалии в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. находился западнее по сравнением с сильнейшими явлениями 1982-1983 и 1997-1998 гг. В июне-августе 2016 г. в центральной части тропического Тихого океана сформировалась отрицательная аномалия ТПО, что свидетельствует о наступлении условий Ла-Нинья.

Ключевую роль в механизме генерации Эль-Ниньо играет ослабление пассатного переноса и, в частности, всплески западных ветров, которые генерируют в океане волны Кельвина. Аномальная антициклоническая циркуляция, формирующаяся в верхней тропосфере, является источником атмосферных длинных волн Россби – главного звена механизма удаленного воздействия Эль-Ниньо. В данной работе проведена оценка аномалий атмосферной циркуляции в нижней и верхней тропосфере в тропиках Тихого океана в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг.

Циркуляция в горизонтальной плоскости оценивалась на основе карт вектора ветра, построенных для нижней тропосферы (850 гПа). Совместное представление данных о зональной и меридиональной компонентах скорости ветра позволяет оценить пространственную структуру поля ветра. Стрелки ориентированы в соответствии с направлением ветра, их размер зависит от скорости ветра (рис. 1, правая панель).





В период развития Эль-Ниньо 2015-2016 гг. над тропическим Тихим океаном в нижней тропосфере наблюдалась значительная западная аномалия скорости ветра в районе экватора (рис. 16, г). Данная аномалия возникла к июнюиюлю 2015 г. к востоку от линии перемены дат и сохранялась в данном районе до июня-августа 2016 г. Наиболее сильные западные ветры отмечались в период, предшествующий кульминации Эль-Ниньо, т. е. в июне-сентябре (рис. 16, г), и сыграли роль спускового механизма возникновения и дальнейшего усиления данного явления. В целом интенсивность западной аномалии ветра составила 4 м/с, что в два раза ниже, чем при Эль-Ниньо 1982-1983 и 1997-1998 гг. (Хие, Китаг, 2016). Тем не менее, отличительной чертой 2015 г. являлось наличие большого числа всплесков западных ветров. В восточной части Тихого океана наблюдались восточные аномалии ветра, что привело к формированию аномальной конвергенции воздуха и усилению восходящих потоков, возникших в результате нагрева воздуха над аномально теплыми поверхностными водами океана. В Северном полушарии в период кульминации Эль-Ниньо наблюдалось значительное усиление западных ветров над умеренными широтами Тихого океана, что соответствует интенсификации циклонической циркуляции Алеутского минимума. В верхней тропосфере (200 гПа) в период кульминации Эль-Ниньо 2015-2016 гг. над экватором отмечался аномальный восточный поток (не приведено на рисунках), компенсирующий западный поток у земной поверхности и являющийся, по сути, высотной ветвью циркуляционной ячейки Уокера.

В период Эль-Ниньо заметные изменения происходят не только на поверхности океана, но и во всей толще перемешанного слоя. Согласно теории Бьеркнеса (Bjerknes, 1969) важнейшую роль в процессе развития Эль-Ниньо играет эволюция наклона термоклина между западной и восточной частями тропического Тихого океана. Термоклин – это слой воды, в котором происходит резкий скачок температуры с глубиной. Мощность термоклина составляет от нескольких метров до немногих десятков метров. На вертикальном профиле температуры термоклин обнаруживается как область сгущения изотерм. Как правило, в тропическом океане термоклин достаточно хорошо аппроксимируется изотермой 20°С (Dewitte et. al., 2009). Выше термоклина располагается верхний однородный перемешанный слой, ниже – более холодный и устойчиво стратифицированный глубокий океан.

На рис 2а, б. представлены вертикальные профили температуры воды в верхнем 300-метровом слое океана в период, предшествующий развитию Эль-Ниньо 2015-2016 (декабрь 2014 – февраль 2015), и в период интенсификации данного Эль-Ниньо (сентябрь-ноябрь 2015 г.). У побережья Индонезии при нейтральных условиях локализован очаг наиболее теплых вод (рис. 2а). С развитием Эль-Ниньо наблюдалось его постепенное расширение на восток. К сентябрю-ноябрю 2015 г. в центральной и восточной частях Тихого океана отмечалось повышение температуры воды до 28°C в верхнем 30-метровом слое (рис. 2б). Аномальное высокое теплосодержание перемешанного слоя океана характерно для всех сильнейших Эль-Ниньо. Отмечалось в 1982, 1997 и 2015 г.



Рисунок 2. (а, б) Долготно-глубинные разрезы для потенциальной температуры океана (°С) на экваторе. Жирной линией выделена изотерма 20°С, примерно соответствующая положению термоклина. (в) Долготно-временной разрез аномалий глубины перемешанного слоя в 2015-2016 гг.

Вместе со смещением на восток очага теплых вод термоклин постепенно приобрел в профиле несколько вогнутую форму. В восточной части Тихого океана термоклин был заглублен и располагался на глубине порядка 100 м, в то время как при нормальных условиях его глубина составляет около 20 м. В западном Тихом океане термоклин, напротив, находился ближе к поверхности, на глубине около 150 м при среднем значении порядка 200 м. Следует отметить, что максимальная аномалия глубины залегания термоклина летом Северного полушария, осредненная по всему экваториальному Тихому океану, в 2015-2016 гг. составила всего 4.6 м, в то время как в период явления 1997-1998 гг. она достигла 14.3 м. (Paek et. al.,2017). Непосредственно у тихоокеанского побережья Южной Америки аномалия глубины залегания термоклина зимой 2015-2016 гг. была приблизительно на 40 м меньше, чем в аналогичные периоды 1982-1983 гг. и 1997-1998 гг. (Xue, Kumar, 2016).

Еще одной важной характеристикой теплосодержания океана является толщина перемешанного слоя, характеризующая глубину залегания термоклина. При нормальных условиях наибольшая глубина залегания термоклина наблюдается в центральной части тропического Тихого океана, в восточной она наименьшая. Во второй половине 2015 г. в центральной и восточной частях Тихого океана отмечалась положительная аномалия глубины перемешанного слоя (рис. 2в), что свидетельствует о заглублении термоклина. Данное явление можно интерпретировать как совокупное действие океанических даунвеллинговых (с заглубленным термоклином) волн Кельвина, возникших в 2015 г. весной и летом Северного полушария на западе Тихого океана и распространившихся к октябрю-ноябрю к побережью Южной Америки. В период, следующий за кульминацией Эль-Ниньо, практически весь централь-

ный и восточный Тихий океан охватывает отрицательная аномалия толщины перемешанного слоя, что указывает на подъем термоклина в тропиках Тихого океана и переход океана в стадию разгрузки (Jin et al, 1997).

### Эволюция вертикальных ячеек циркуляции

Движения воздуха в атмосфере тропиков организованы преимущественно в виде термических замкнутых вертикальных ячеек циркуляции: зональной (ячейка Уокера) и меридиональной (ячейка Хэдли). В период развития Эль-Ниньо отмечаются заметные изменения структуры вертикальных ячеек циркуляции вследствие перераспределения источников тепла (Гущина и др., 1997, Семенов и др., 2007). Именно вертикальные ячейки циркуляции играют роль «атмосферных мостов», способствующих распространению аномального сигнала из тропиков Тихого океана в удаленные районы, как в пределах тропического пояса, так и во внетропические широты (Wang et al., 2002).

В данной работе проводится анализ эволюции вертикальных ячеек циркуляции в период развития Эль-Ниньо 2015-2016 гг. Для оценки особенностей циркуляции в ячейках Уокера и Хэдли были построены разрезы аномалий циркуляции в вертикальной плоскости, наблюдавшихся во все фазы развития Эль-Ниньо.

## Ячейка Уокера

Аномалии вертикальной циркуляции в зональном направлении в период зарождения, развития, кульминации и затухания Эль-Ниньо 2015-2016 гг. представлены на рис. 3.



Рисунок З. Аномалии зональной ячейки Уокера в районе экватора (5° с. ш. – 5° ю. ш.) в период Эль-Ниньо 2015–2016 гг.

Методика построения ячеек описана в разделе «Данные и методика»

Аномальные восходящие движения над восточной и центральной частями экваториального Тихого океана сформировались уже в июне-августе 2015 г. над очагом аномально теплых поверхностных вод. При нормальных условиях в данном районе происходит опускание воздуха в нисходящей ветви ячейки Уокера. В сентябре-октябре 2015 г. восходящие движения к востоку от линии перемены дат сохранялись, а в период кульминации они распространились на восточную часть экваториального Тихого океана. Таким образом, восходящая ветвь ячейки Уокера сместилась на восток вслед за очагом аномально теплых вод.

Следует отметить, что в районе экватора в период кульминации Эль-Ниньо (рис. 3в) практически повсеместно преобладали усиленные восходящие движения, за исключением области над Атлантикой, где ТПО была близка к норме. Ослабление вертикальных движений отмечалось и над экваториальными районами Южной Америки.

Также были проанализированы аномалии ячейки Уокера в Северном (5-15° с. ш.) и Южном (5-15° ю. ш.) полушариях (рисунки не приводятся). К северу от экватора в центральной части тихоокеанского бассейна в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. отмечалось усиление восходящих движений над очагом аномально теплых вод, некоторое ослабление восходящих потоков наблюдались только над южной частью Карибского моря. В Южном полушарии в период развития и кульминации Эль-Ниньо над тропическим Тихим океаном наблюдалось ослабление подъема воздуха в его восточной части и усиление восходящих движений в центральной, то есть ячейка Уокера в данном регионе имела структуру, типичную для Эль-Ниньо Модоки.

## Ячейка Хэдли

Ячейка Хэдли представляет собой вертикальную циркуляцию в меридиональном направлении. Восходящая ветвь ячейки Хэдли обычно располагается в области активной конвекции вблизи экватора. В верхней тропосфере происходит отток поднявшегося теплого воздуха в тропические широты, где отмечаются нисходящие движения воздуха в области субтропических антициклонов. Замыкается ячейка путем возвращения воздуха к экватору у земной поверхности в системе пассатов. Однако выраженность ячейки Хэдли неодинакова по Земному шару и зависит от географического района. Она четко проявляется над Атлантикой и в центральной части Тихого океана. На востоке Тихого океана в нормальных условиях ячейка Хэдли ослаблена, поскольку над холодными поверхностными водами восходящие движения менее интенсивны.

В рамках настоящего исследования проанализирована эволюция ячеек Хэдли в 9 секторах Земного шара для фаз развития, кульминации и затухания Эль-Ниньо 2015-2016 гг. На рис. 4 представлены аномалии циркуляции в ячейке Хэдли для ряда регионов в тропиках в фазу кульминации Эль-Ниньо 2015-16 гг.

Над Тихим океаном наблюдается усиление восходящей ветви ячейки Хэдли в районе экватора (рис. 4а, б). Именно в районе экватора начиная с

марта-мая 2015 г. в течение всего жизненного цикла Эль-Ниньо сохранялась значительная положительная аномалия осадков, вызванная этими усиленными восходящими движениями. Следует отметить, что восходящие движения лучше выражены в районе линии перемены дат по сравнению с восточной частью Тихого океана. К северу и к югу от экватора наблюдаются отрицательные аномалии вертикальных движений, что соответствует усилению нисходящей ветви ячейки Хэдли и приводит к формированию в этом районе засушливых условий в период Эль-Ниньо (так называемый «сухой бумеранг»).



Рисунок 4. Аномалии меридиональной ячейки Хэдли в период кульминации Эль-Ниньо 2015-2016 гг. (декабрь 2015 г. – февраль 2016 г.) Методика построения ячеек описана в разделе «Данные и методика»

Над Атлантикой в период развития Эль-Ниньо отмечались значительные изменения ячейки Хэдли (рис. 4в, г). В период кульминации Эль-Ниньо над Южной Америкой и Карибским морем отмечалась отрицательная аномалия вертикальной скорости, охватившая практически всю толщу атмосферы. В данном районе располагается нисходящая ветвь ячейки Уокера (рис. 3). Перенесенный сюда в верхней тропосфере с запада воздух растекался в направлении полюсов, при этом постепенно опускаясь. В центральной Атлантике господствовали аномальные нисходящие движения; подъем воздуха сохранялся только в области между экватором и 10° с. ш., но и он был заметно ослаблен. В данном районе в первой половине 2016 г. наблюдалась отрицательная аномалия осадков.

Над западной частью Индийского океана в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. прослеживалась интенсификация ячейки Хэдли (рис. 4д, е) – положительные аномалии (восходящие движения) в районе экватора, что отразилось в усилении осадков, и отрицательные аномалии, соответствующие опусканию воздуха, в тропиках. Однако в начале 2016 г. господствовала отрицательная фаза индекса IOD – Индийского Океанического Диполя (Indian Ocean Dipole), т. е. в западной части Индийского океана сформировался очаг относительно холодных вод, в связи с чем восходящие движения здесь были ослаблены, и, соответственно, уменьшилась и положительная аномалия осадков.

Над восточным Индийским океаном в период, предшествующий кульминации Эль-Ниньо, отмечалось усиление нисходящих движений над относительно холодными водами (положительные значения IOD во второй половине 2015 г.) к югу от экватора, что вызвало в данном регионе уменьшение количества осадков. В момент кульминации Эль-Ниньо (декабрь 2015 г. – февраль 2016 г.) над данным районом отмечалось четыре изолированных друг от друга области аномальных восходящих движений. В период затухания Эль-Ниньо (март-май 2016 г.) к северу от экватора, над юго-восточной Азией, отмечались более слабые, чем обычно, восходящие движения. В июне-августе 2016 г вслед за этим ослаблением отмечалась отрицательная аномалия осадков в Индии и юго-восточной Азии, что соответствует ослабленному индийскому муссону.

## Определение типа Эль-Ниньо 2015-2016 гг.

В процессе наблюдения Эль-Ниньо 2015-2016 гг. у специалистов, изучающих данное явление, возникли разногласия по поводу отнесения его к одному из двух типов (каноническому или Модоки).

Согласно методике, описанной в работе (Yeh et al., 2009), Эль-Ниньо выделяется, когда средние значения АТПО в регионах Niño3 и Niño4 превышают 0.5°С. Если АТПО в течение декабря-января-февраля превышает 0.5°С и при этом в Niño3 больше, чем в Niño4, то событие относится к каноническому типу, если АТПО выше в Niño4, то к Эль-Ниньо Модоки. Однако два типа Эль-Ниньо различаются не только локализацией аномалий ТПО, но и механизмами формирования, аномалиями атмосферной циркуляции и характером сопутствующих удаленных аномалий.

Для наиболее точного определения типа, к которому относится Эль-Ниньо 2015-2016 гг., было проведено сравнение данного явления с наблюдавшимися за период с 80-х гг. XX в. каноническими и Модоки Эль-Ниньо. Методом композиционного анализа были получены схемы эволюции характеристик атмос-

феры и океана для каждого из двух типов Эль-Ниньо. В пределах доступного периода наблюдений (1979-2014 гг.) были выбраны все двухлетние временные промежутки, соответствующие годам Эль-Ниньо каждого типа. Годы, в которые наблюдались явления Эль-Ниньо, приведены в табл. 1.

Каноническое Эль-Ниньо	Эль-Ниньо Модоки
1082-1083	1000 1001
1962-1965	1990-1991
1997-1998	1994-1995
	2002-2003
	2004-2005
	2006-2007
	2009-2010

Таблица 1. Годы, соответствующие явлениям Эль-Ниньо двух типов

Поскольку тип Эль-Ниньо определяется прежде всего по структуре АТПО, в первую очередь проведено сравнение эволюции ТПО в 2015-16 гг. с композиционными схемами канонического и Модоки Эль-Ниньо. На стадии, предшествующей кульминации Эль-Ниньо 2015-2016 гг. (июль-ноябрь 2015 г.), картина распределения ТПО не имела значительных отклонений от сценария канонического Эль-Ниньо (рис. 5а), в то время как по сравнению с Эль-Ниньо Модоки (рис. 5д) восточная часть экваториального Тихого океана была значительно более прогрета (положительные аномалии). Однако начиная с ноября 2015 г. наблюдаются значительные отрицательные аномалии ТПО по сравнению с каноническим Эль-Ниньо, что связано со смещением очага максимальной положительной аномалии ТПО в центральную часть Тихого океана. Положительная аномалия относительно Эль-Ниньо Модоки на востоке Тихого океана сохраняется, хотя и выражена слабее. Таким образом, данное Эль-Ниньо на этапах развития с точки зрения аномалий ТПО ближе к явлению канонического типа, а на стадии затухания – к Эль-Ниньо Модоки.

В период развития и кульминации Эль-Ниньо 2015-2016 гг. в поле зонального ветра в нижней тропосфере отклонения относительно канонического Эль-Ниньо меньше, чем относительно Эль-Ниньо Модоки (рис. 56, е). В 2015 г. над Тихим океаном преобладали значительные западные аномалии ветра, тогда как при Эль-Ниньо Модоки в восточной части тихоокеанского бассейна сохраняются достаточно интенсивные пассаты, препятствующие распространению очага теплых вод на восток. После кульминации Эль-Ниньо 2015-2016 гг. произошло усиление пассаты в первой половине 2016 г. были слабее, чем обычно при Эль-Ниньо Модоки, с чем связаны положительные отклонения в поле скорости ветра (рис. 5е).

Поле вертикальных движений в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. больше соответствует структуре, характерной для Эль-Ниньо Модоки (отклонения от Эль-Ниньо Модоки меньше по сравнению с каноническим типом (рис. 5в, ж)). На стадии развития Эль-Ниньо 2015-2016 гг. отклонения вертикальных

### А.М. Осипов, Д Ю. Гущина

движений от композиционной схемы канонического Эль-Ниньо невелики (рис. 5в). Однако в период кульминации над центральной и восточной частями Тихого океана отмечаются значительные положительные отклонения, а над западным Тихим океаном — отрицательные. Это соответствует более слабым восходящим движениям в центре и на востоке и более слабым нисходящим — на западе. Отклонения от композиционной схемы Эль-Ниньо Модоки значительно меньше (рис. 5ж). Таким образом, с точки зрения эволюции аномалий поля вертикальных движений Эль-Ниньо 2015-2016 гг. ближе к явлению канонического типа только на стадии развития и похоже на Модоки на стадии затухания и, хотя и в меньшей мере, в период кульминации.





а 500 гна (w 500) и осадков от композиционных схем эволюции при каноническом (верх панель) и Модоки (нижняя панель) Эль-Ниньо

Для зональной скорости ветра положительные отклонения соответствует более интенсивным западным ветрам, отрицательные – более сильным восточным. Для аналога вертикальной скорости положительные значения соответствуют усилению нисходящих движений, отрицательные – восходящих. Интервалы: 0.5°С для ТПО; 2 м/с для зональной компоненты скорости ветра; 0.03 Па/с для аналога вертикальной скорости; 2 мм/месяц для осадков

В поле атмосферных осадков в период, предшествующий кульминации Эль-Ниньо, не отмечалось значительных отклонений от схемы канонического Эль-Ниньо (рис. 5г), в то время как по сравнению с Эль-Ниньо Модоки отмечалась положительная аномалия осадков к западу от линии перемены дат (рис. 53). Во время максимального развития Эль-Ниньо 2015-2016 гг. в восточной части Тихого океана отмечались аномально сильные по сравнению с обоими типами Эль-Ниньо осадки. В восточном Тихом океане в период кульминации Эль-Ниньо 2015-2016 гг. отмечались значительные отрицательные отклонения в поле осадков по сравнению с каноническим Эль-Ниньо (рис. 5г), что было связано с положением максимума АТПО и восходящих движений ближе к линии перемены дат. В работе (Santoso, 2017) отмечалось, что осадки в регионе Niño3 в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. были значительно слабее, чем во время мощнейших явлений 1982-1983 и 1997-1998 гг. Данный факт позволяет несколько противопоставить Эль-Ниньо 2015-2016 гг. двум другим экстремальным явлениям (на основе которых построены композиционные схемы для канонического Эль-Ниньо – см. табл. 1), для которых характерны максимальные аномалии осадков в восточной части Тихого океана. В то же время Эль-Ниньо 2015-2016 гг. характеризуется значительно более сильными осадками в центральной части Тихого океана, чем при Эль-Ниньо Модоки. Такое распределение аномалий осадков не позволяет однозначно определить тип Эль-Ниньо на основе анализа осадков.

Таким образом, было выявлено, что у явления Эль-Ниньо 2015-2016 гг. наличествует много общих черт с каждым из двух типов Эль-Ниньо. При этом в период зарождения и развития данного явления состояние атмосферы и океана было приближено к условиям канонического Эль-Ниньо, после его кульминации – к условиям Эль-Ниньо Модоки. Подобная эволюция аномалий отмечалась и при Эль-Ниньо 1986-1987 гг., которое также на начальных этапах напоминало каноническое, на заключительных – Модоки Эль-Ниньо, и в конечном счете было отнесено к каноническому типу. Явление Эль-Ниньо 2015-2016 гг. также можно считать каноническим.

## Механизм формирования

В ряде работ (McPhaden et al., 2006, Hendon et al., 2007, Gushchina and Dewitte, 2011, 2012; Puy et al., 2017) было показано, что в механизме генерации Эль-Ниньо важную роль играет стохастическое воздействие со стороны атмосферы. Рост ТПО в восточной части Тихого океана в первую очередь обусловлен заглублением термоклина, которое является результатом прохождения океанической волны Кельвина, распространяющейся из западной части Тихого океана. Для возникновения такой волны необходимо воздействие со стороны атмосферы. Океанические волны Кельвина генерируются западной аномалией ветра над западным Тихим океаном весной, предшествующей кульминации Эль-Ниньо. Западные аномалии ветра могут создаваться атмосферными возмущениями внутрисезонного масштаба в атмосфере, а именно колебаниями Маддена-Джулиана (МЈО) и экваториальными волнами Россби (Hendon et al., 2007; Gushchina and Dewitte, 2012).

Эль-Ниньо 2015-2016 гг. было одним из сильнейших в истории наблюдений, в связи с чем оценка эволюции компонент ВТИ (МЈО и экваториальных волн Россби) и их вклада в генерацию данного Эль-Ниньо представляет особый интерес. Особое внимание необходимо сфокусировать на сравнении 2015 г. с 2014 г., поскольку так называемое «несостоявшееся» Эль-Ниньо 2014-2015 гг. предсказывалось многими прогностическими моделями именно на основании активизации МЈО весной 2014 г. Однако оно не достигло своей кульминации, так как к концу 2014 г. аномалия ТПО в восточном Тихом океане исчезла.

На рис. 6 представлена эволюция аномалий ТПО (a, e), МЈО (б, ж), экваториальных волн Россби (в, з), первой (г, и) и второй (д, к) бароклинной мод океанических волн Кельвина в 2015 г. (верхняя панель) и 2014 г. (нижняя панель). Долготно-временные разрезы представлены в терминах среднеквадратичных отклонений (СКО) поля ветра на уровне 850 гПа, отфильтрованного в интервале соответствующих компонент ВТИ и СКО уровня океана, спроецированного на меридиональную структуру океанической волны Кельвина (см. раздел «Данные и методика»). Положительные значения СКО следует интерпретировать как рост интенсивности соответствующего возмущения в атмосфере или океане, отрицательные – как их ослабление.



Рисунок 6. Рисунок 6. Аномалии ТПО, осредненные по районам Niño 3 (5° ю. ш. – 5° с. ш.; 150°–90° з. д.; синяя линия) и Niño 4 (5° ю. ш. – 5° с. ш.; 160°в. д. – 150°з. д.; красная линия) для условий 2015 г.(а) и 2014 г. (е). Долготно-временные разрезы вдоль экватора аномалий скользящего среднеквадратичного отклонения (СКО) поля ветра на 850 гПа,

отфильтрованного в интервале МЈО (б, ж), экваториальных волн Россби (в, з), первой (г, и) и второй (д, к) бароклинной мод океанической волны Кельвина (АКМ1 и АКМ2 соответственно) в 2015 г. (верхняя панель) и 2014 г. (нижняя панель).

Интервал 0.1 м/с для МЈО и волн Россби, 0.2 см для первой и второй моды волны Кельвина

В 2015 г. наблюдается два значительных всплеска интенсивности МЈО; им соответствуют положительные аномалии (рис. 6б). Первый отмечается в

апреле-июле. Именно он спровоцировал возникновение океанической волны Кельвина, ответственной за формирование аномалий ТПО на востоке Тихого океана во второй половине 2015 г. (рис. 6а)

Второй максимум интенсивности МЈО возник в октябре 2015 г. и прослеживался вплоть до февраля 2016 г., способствуя сохранению положительной аномалии ТПО на востоке Тихого океана, т.е. поддерживая условия Эль-Ниньо. В течение второй половины 2016 г. интенсивность МЈО постепенно уменьшалась, что способствовало ослаблению волн Кельвина, подъему термоклина на востоке Тихого океана, уменьшению аномалий ТПО и переходу к отрицательной фазе ЭНЮК (рис. 6а).

Необходимо отметить, что сами по себе аномалии интенсивности МЈО не дают представления о том, восточные или западные аномалии ветра отмечались в период увеличения интенсивности, так как с колебанием Маддена-Джулиана связано чередование областей с западными и восточными аномалиями ветра. Был проведен анализ асимметрии ряда скорости ветра в интервале МЈО, который показал, что в начале 2015 г. преобладала положительная асимметрия, что соответствует более интенсивным западным аномалиям ветра в этот период. Это, в свою очередь, указывает на значительный вклад МЈО в формирование всплесков западных ветров и генерацию волн Кельвина в океане.

На рис. 6в представлена эволюция интенсивности экваториальных волн Россби в 2015-2016 гг. В феврале-марте 2015 г. прослеживался всплеск интенсивности волн Россби в центральной части Тихого океана. Усиление волн Россби отмечалось также во второй половине 2015 г., причем происходило оно в двух изолированных очагах в западной и центральной частях Тихого океана. Однако всплеск интенсивности волн Россби в августе-октябре 2015 г. в западной части Тихого океана имел отрицательную асимметрию, то есть был обусловлен восточной аномалией ветра, которая не принимает участия в генерации Эль-Ниньо. Для всплесков волн Россби в феврале-марте и сентябре-октябре 2015 г. характерна положительная асимметрия, т. е. в этот момент наблюдалось усиление западного ветра, необходимого для генерации волны Кельвина в океане.

Океаническая волна Кельвина – основной механизм, обеспечивающий распространение с запада на восток аномалии глубины залегания термоклина. Волна Кельвина возбуждается западными аномалиями ветра, которые, в свою очередь, могут быть связаны с МЈО и экваториальными волнами Россби. Для оценки возможного воздействия МЈО и волн Россби на возникновение внутрисезонной экваториальной волны Кельвина (ВЭВК) в океане в период Эль-Ниньо проведено сопоставление сезонного хода аномалий ВТИ и аномалий интенсивности волн Кельвина в 2015 году. Используя ту же методику, что и для расчета интенсивности атмосферных волн, был получен временной ряд скользящего СКО (расчет велся для трехмесячного скользящего окна) внутрисезонной экваториальной волны Кельвина. На рис. 6 г, д представлены отклонения от среднего годового хода скользящего СКО первой и второй бароклинных мод ВЭВК в период Эль-Ниньо 2015 г. Они могут быть напрямую сопоставлены с аномалиями интенсивности волн Россби и МЈО в атмосфере (рис. 6 б, в), что позволяет выявить влияние атмосферных возмущений на океаническую циркуляцию в условиях Эль-Ниньо.

При анализе океанических волн Кельвина рассматривались первые две вертикальные бароклинные моды, которые отражают особенности распределения аномалий температуры воды в вертикальной плоскости. Первая мода описывает структуру верхнего перемешанного слоя океана и положение термоклина, а вторая мода характеризует аномалии температуры в верхнем перемешанном слое. Волна Кельвина выделена в поле аномалий уровня океана. Положительные аномалии уровня океана, в соответствии с сохранением гидростатического равновесия, соответствуют заглублению термоклина, а отрицательные – подъему термоклина. Поэтому анализ аномалий уровня позволяет судить об аномалиях залегания термоклина и их распространении.

На рис. 6 б, г видно, что положительная аномалия интенсивности МЈО, наблюдающаяся в марте-июле 2015 г., индуцирует положительную аномалию первой бароклинной моды океанической волны Кельвина. Еще один всплеск интенсивности волны Кельвина отмечается в восточной части Тихого океана и достигает своего максимума в ноябре 2015 г. Ему также соответствует положительная аномалия интенсивности МЈО (по величине несколько меньше первой). Важно отметить, что для первой бароклинной моды характерна положительная асимметрия сигнала. Следовательно, увеличение интенсивности волны Кельвина связано с повышением уровня океана и соответствующим заглублением термоклина.

Аномальное усиление волны Россби в январе марте индуцирует первый всплеск интенсивности второй бароклинной моды (рис. 6 в, д). Вторая аномалия интенсивности второй моды отмечается в июне-ноябре. Ей также соответствует усиление волн Россби в атмосфере. Таким образом, можно отметить, что в 2015 году отмечалось два пакета волн Кельвина. Именно второй пакет поддержал возникшую ранее на востоке Тихого океана положительную аномалию ТПО и способствовал сохранению и усилению условий Эль-Ниньо.

Следует отметить, что, как было показано в работах (Dewitte et al., 2002) и (Гущина и др., 2000), за возникновение наиболее сильных Эль-Ниньо ответственна именно вторая бароклинная мода волны Кельвина. Результаты моделирования показали, что при уменьшении вклада второй бароклинной моды не воспроизводятся сильные Эль-Ниньо, такие как явление 1997-1998 гг. Именно аномалии второй бароклинной моды волны Кельвина важны с точки зрения развития исключительно сильного Эль-Ниньо в 2015 г., а они, как показывают результаты настоящего исследования, обусловлены воздействием экваториальных конвективно-связанных волн Россби.

Представляет несомненный интерес сравнить эволюцию компонент ВТИ в 2014 г. и в 2015 г., чтобы определить насколько различался вклад МЈО и волн Россби в генерацию несостоявшегося Эль-Ниньо 2014 г. и мощнейшего Эль-Ниньо 2015 г. В 2014 г. отмечалось усиление интенсивности МЈО и экваториальных волн Россби в марте-апреле (рис. 6ж,з), спровоцировавшее в океане возникновение волны Кельвина (рис. 6и, к). Аномалии проявились как в первой, так и во второй бароклинных модах. Возникший пакет волн Кельвина достиг побережья Южной Америки в мае-июне и привел к росту ТПО в данном районе (значение АТПО в регионе Niño 3 близко к 1°С (рис. 6е)). Однако во второй половине 2014 г. интенсивность волн в атмосфере была значительно меньше, чем в 2015 г., и не вызвала отклика в океане. Напротив, отмечалась отрицательная аномалия интенсивности волн Кельвина. Это также обусловлено тем, что не наблюдалось преобладания западных аномалий ветра в этот период (асимметрия сигнала близка к нулю), а чередование западных и восточных аномалий ветра не способно сгенерировать пакет волн Кельвина. В результате возникшая в восточной части Тихого океана положительная аномалия ТПО не получила дальнейшего развития, вследствие чего Эль-Ниньо в 2014-2015 гг. не состоялось.

## Сопутствующие удаленные аномалии

При изучении Эль-Ниньо один из ключевых вопросов следующий: являются ли сопутствующие удаленные аномалии, а именно аномалии метеорологических условий, возникающие в различных районах Земного шара, следствием воздействия Эль-Ниньо. Особую важность представляют отклонения от климатического режима атмосферных осадков и приземной температуры воздуха, потому что именно с ними связаны некоторые неблагоприятные и опасные метеорологические условия, такие как засухи, наводнения, лесные пожары.

Ранее в ряде работ были получены и описаны обобщенные схемы отклика как для Эль-Ниньо в целом (Ropelewski and Halpert, 1987; Trenberth et al., 1998; Мохов и др., 2012), так и для каждого из двух типов данного явления в отдельности (Железнова и Гущина 2015, 2016, 2017).

Отклик на Эль-Ниньо 2015 г. в полях приземной температуры воздуха и атмосферных осадков определялся путем сравнения наблюдавшихся в 2015-2016 гг. аномалий относительно среднего климатического состояния (1979-2014 гг.) с композиционными схемами аномалий для двух типов Эль-Ниньо (канонического и Модоки), полученными ранее в работе (Железнова, 2015) на основе метода частной регрессии. При наложении аномалии 2015-16 гг. на аномалию того же знака в композиционной схеме одного из типов Эль-Ниньо данная аномалия рассматривалась как проявление удаленного отклика на Эль-Ниньо (рис. 7-8), то есть как сопутствующая аномалия. Аномалии, не совпавшие с композиционными схемами, могут быть отнесены к проявлению других крупномасштабных колебаний.

В период кульминации Эль-Ниньо максимальные аномалии приземной температуры воздуха отмечались в Арктике (рис. 7а). В период с июля по октябрь 2015 г. отмечались положительные значения индекса Арктического колебания (АО), что свидетельствует об усилении меридионального обмена теплом между высокими и умеренными широтами Северного полушария, вследствие чего в арктический регион мог проникать более теплый воздух. Также положительная аномалия температуры в Арктике может быть связана с глобальным трендом температуры, который проявляется сильнее всего в

высоких широтах Северного полушария, причем аномалии больше в зимние месяцы. Однако данная аномалия не связана с влиянием Эль-Ниньо. К июню-августу 2016 г. аномалия стала не столь выраженной (рис. 7в).



**Рисунок 7.** Аномалии температуры воздуха на высоте 2 м в сравнении с композиционной схемой распределения аномалий при каноническом (левая панель) и Модоки (правая панель) Эль-Ниньо в декабре 2015 г. – феврале 2016 г. (верхняя панель) и июне-августе 2016 г.

(нижняя панель)

Штриховкой выделены области, где аномалии в 2015-16 гг. и аномалии композиционных схем имеют один знак. Цвет контура соответствует знаку аномалий: красный – положительным, синий – отрицательным. Интервал – 1°С, однако в диапазоне около 0 уменьшен до 0.5 °С

Обширный очаг положительных аномалий приземной температуры воздуха приурочен непосредственно к району локализации явления Эль-Ниньо. Он связан с потоком явного и скрытого тепла от аномально теплых поверхностных вод океана. Однако уже к июню-августу 2016 г. в районе экватора сформировалась слабая отрицательная аномалия температуры, связанная со снижением ТПО, т. е. с окончанием Эль-Ниньо. Тем не менее, в тропических широтах Тихого океана обусловленные влиянием Эль-Ниньо очаги тепла сохранялись.

Над Индонезией, центральной частью Индийского океана и юго-восточной частью полуострова Индостан также наблюдались аномально теплые условия, причем распределение приземной температуры было ближе к схеме канонического Эль-Ниньо (рис. 7а). Положительные аномалии температуры в основном обусловлены радиационным фактором: в условиях Эль-Ниньо мощная облачность, вызванная интенсивной конвекцией, смещалась на восток вслед за языком теплой воды, инсоляция над Индонезией и Индийским океаном увеличилась, что привело к росту приземной температуры. Связанные с Эль-Ниньо положительные аномалии температуры сохранялись в данном регионе до июня-августа 2016 г. (рис. 7в).

На большей части южной Африки сформировались более теплые, чем обычно, условия. В этом регионе отмечалось усиление нисходящих движений, и рост температуры мог быть вызван динамическим нагревом воздуха

при опускании. В районе пустыни Сахары, напротив, было аномально холодно. Здесь наблюдались незначительные нисходящие движения, что послужило причиной уменьшения и без того малого в данном районе количества облачности; это, в свою очередь, способствовало уменьшению встречного излучения атмосферы и, соответственно, могло привести к понижению температуры воздуха. Распределение аномалий приземной температуры над Африканским континентом в целом соответствовало каноническому Эль-Ниньо.

Значительно теплее нормы зимой 2015-2016 гг. было в центральной Европе, что согласуется со схемой отклика на каноническое Эль-Ниньо. Аномально теплые условия наблюдались в Сибири, что, по всей видимости, обусловлено положительной аномалией температуры в Арктике: при полярных вторжениях в Сибирь проникал более теплый, чем обычно в это время года, воздух. Однако статистическим схемам оклика на Эль-Ниньо этот очаг тепла не соответствует. Данная положительная аномалия температуры в Сибири возникла еще до начала развития Эль-Ниньо.

Очаг тепла отмечался над Желтым морем и Корейским полуостровом. В период Эль-Ниньо канонического типа над Японским архипелагом и тихоокеанским побережьем Китая доминируют ветра южного направления, что обуславливает формирование положительной аномалии приземной температуры (Yuan and Yang, 2012). Однако и при Эль-Ниньо Модоки в этом регионе формируются более теплые условия.

Над северной частью Тихого океана к моменту кульминации Эль-Ниньо сформировался очаг холода, обусловленный интенсификацией Алеутского минимума, что подтверждается отрицательной аномалией геопотенциальной высоты поверхности 700 гПа. Интенсификация Алеутского минимума обуславливает распределение аномалий приземной температуры: над центральной частью Тихого океана наблюдался заток холода с севера и северо-востока по западной периферии циклона, над восточными прибрежными районами – вынос тепла по его восточной периферии с юга и юго-запада.

Значительные положительные аномалии температуры наблюдались в Северной Америке. В период Эль-Ниньо на востоке Тихого океана тихоокеанское струйное течение отклоняется к югу, что приводит к изменению положения штормтреков. Большая часть циклонов выходит в район Калифорнии, что вызывает здесь усиление осадков. Увеличивается и интенсивность циклонов в данном регионе, что согласуется с усилением Алеутского минимума. По восточной периферии циклонов усиливается заток тепла с юга – юго-запада. Полярное струйное течение в период Эль-Ниньо локализовано в районе Гудзонова залива. Оно препятствует крупномасштабным затокам холода с севера и приводит к формированию аномально теплых условий над большей частью Северной Америки.

Значительное увеличение осадков в 2015-16 гг. отмечалось над центральной частью тропического Тихого океана, т. е. в зоне с активной конвекцией в восходящей ветви ячейки Уокера, причем локализация максимума аномалии осадков соответствует схеме канонического Эль-Ниньо (рис. 8а, в).



Рисунок 8. Аномалии количества осадков в сравнении с композиционной схемой распределения аномалий при каноническом (левая панель) и Модоки (правая панель) Эль-Ниньо в декабре 2015 г. - феврале 2016 г. (верхняя панель) и июне-августе 2016 г. (нижняя панель)

Штриховкой выделены области, где совпадают аномалии одного знака. Цвет контура соответствует знаку аномалий: зеленый – положительным, оранжевый – отрицательным

Также в поле аномалий осадков проявился так называемый «сухой бумеранг» над Индонезией и тропическим Тихим океаном, обусловленный смещением на восток восходящей ветви ячейки Уокера с характерной для нее активной конвекцией и ливневыми осадками. В то же время в районе «сухого бумеранга» отмечается усиление нисходящих движений в нисходящих ветвях ячейки Хэдли (рис. 8а). К июню-августу 2016 г. отрицательные аномалии осадков сохранялись только непосредственно в Индонезии и на Филиппинах. По всей видимости, это является следствием ослабления летнего Индийского муссона. Известно, что в большинстве случаев при умеренных и сильных Эль-Ниньо отмечается ослабление муссона и уменьшение количества осадков в Индии и юго-восточной Азии (Мохов и др., 2012). Поскольку практически при всех сильных явлениях Эль-Ниньо отмечалось ослабление муссона и уменьшение количества осадков в Индии, аналогичная аномалия в июне-августе 2016 г. может рассматриваться как отклик на Эль-Ниньо.

Известно, что сильные осадки привели к цветению пустыни Атакамы в ноябре 2015 г. Наводнения наблюдались в Перу, Эквадоре, Бразилии, Парагвае. Вызвавшие эти катастрофические явления осадки не проявились в средних сезонных значениях аномалий и не совпадают с контурами, выделенными на композиционных картах отклика. Вероятно, это связано с большой пространственной изменчивостью полей осадков и относительно малым временным масштабом: масштаб аномалий осадков ближе к синоптическому и может не проявляться на масштабе сезонного осреднения.

Отрицательная аномалия осадков наблюдалась в Бразилии, где засушливые условия вызвали интенсификацию лесных пожаров. Уменьшение количества осадков было вызвано господством в данном регионе нисходящих движений, что привело к ослаблению конвективных процессов. Опускание воздуха происходило в нисходящей ветви ячейки Уокера. Засушливые условия отмечались также над экваториальными районами Атлантического океана. К июню-августу 2016 г. данная аномалия распространилась на район Панамского перешейка, что является характерным откликом на Эль-Ниньо обоих типов.

Необычно много осадков выпало над центральной частью Индийского океана и прибрежными районами Танзании в ноябре 2015 г. В конце 2015 г. аномальные осадки отмечались в Кении. Однако данная аномалия в статистических схемах отклика на Эль-Ниньо отсутствует. На масштабе сезона аномалия могла оказаться не выраженной, тем не менее, она имела место на меньших временных масштабах.

В южной части Африки наблюдались засушливые условия, соответствующие каноническому типу Эль-Ниньо, однако в декабре 2015 г. – феврале 2016 г. аномалии отмечались несколько севернее, чем можно было бы ожидать (рис. 8а).

В конце 2015 г. в юго-восточной части Северной Америки отмечались сильные осадки, которые вызвали наводнения на реках Миссури и Миссисипи. Рост количества осадков в данном районе является типичным откликом на каноническое Эль-Ниньо. Увеличение осадков связано с миграцией в период Эль-Ниньо струйного течения.

#### Заключение

В настоящей работе проведено комплексное всестороннее исследование Эль-Ниньо 2015-2016 гг. Рассмотрена эволюция аномальных условий в океане и атмосфере, механизмы формирования данного явления и особенности сопутствующих удаленных аномалий.

На основе анализа эволюции характеристик в атмосфере и океане в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. данное явление было отнесено к каноническому типу, несмотря на наличие ряда общих черт с типом Модоки. В период, предшествующий кульминации, данное явление было более похоже на каноническое, после кульминации – на Модоки Эль-Ниньо. Явление 2015-2016 гг. во многом сходно с Эль-Ниньо 1986-1987 гг., которое также имело черты, присущие обоим типам Эль-Ниньо, но, тем не менее, тяготело к каноническому.

Проведено исследование особенностей ячеек вертикальной циркуляции (Уокера и Хэдли) в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. Выявлен сдвиг восходящей ветви ячейки Уокера к востоку от линии перемены дат. Аномальный подъем воздуха вызвал значительное усиление осадков в центральном и восточном Тихом океане. Над Тихим океаном отмечалось усиление ячейки Хэдли во время кульминации Эль-Ниньо 2015-2016 гг. Климатическая структура ячейки Хэдли над Атлантическим и Индийским океанами была нарушена.

На основе оценки вклада компонентов ВТИ в формирование Эль-Ниньо 2015-2016 гг. был сделан вывод о значительной роли интенсификации колеба-

ний Маддена-Джулиана и экваториальных волн Россби в период, предшествующий Эль-Ниньо. Под воздействием данных атмосферных возмущений в океане сформировалось два пакета волн Кельвина, заглубивших термоклин в восточной части Тихого океана, что, в свою очередь, привело к формированию условий Эль-Ниньо. Сравнение эволюции компонент ВТИ и волны Кельвина в период Эль-Ниньо 2015-2016 гг. и не состоявшегося явления в 2014 г. позволило сделать вывод о ключевой роли второго пакета волн Кельвина, поддержавшего возникшую ранее аномалию ТПО, в генерации сильнейшего явления в 2015 г.

Исследование аномалий погоды, наблюдавшихся по всему Земному шару после кульминации Эль-Ниньо 2015-2016 гг., показало, что это сильнейшее Эль-Ниньо сопровождалось крупными гидрометеорологическими аномалиями далеко за пределами тропического Тихого океана. Это были удаленные аномалии в поле приземной температуры, прежде всего в восточном экваториальном Тихом океане, юго-восточной Азии, южной части Африки и в Северной Америке, где отмечались аномально теплые условия. В северной части Тихого океана и в ряде районов побережья Антарктиды отмечались аномально холодные условия. В поле осадков отмечались положительные аномалии в восточной части экваториального Тихого океана. Отрицательные аномалии наблюдались в западной части Тихого океана и Индонезии, в районе Амазонии и экваториального Атлантического океана.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность Борису Девитту (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale, Тулуза, Франция) за предоставленные данные по океаническим волнам Кельвина. Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы №АААА-А16-116032810086-4 и при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-05-00767.

#### Список литературы

Гущина Д.Ю., Семенов Е.К. и Петросянц М.А. 1997. Эмпирическая модель циркуляции тропической тропосферы в период явления Эль-Ниньо – Южное Колебание. Часть 2. Анализ эволюции циркуляционных характеристик в условиях ЭНЮК. – Метеорология и гидрология, №2, с. 5-24.

Гущина Д.Ю., Девитт Б., Петросянц М.А. 2000. Объединенная модель тропического Тихого океана и атмосферы. Прогноз явления ЭНЮК 1997-98 гг. – Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, т. 36, № 5, с. 581-604

Железнова И. В. 2015. Отклик в система океан-атмосфера на каноническое Эль-Ниньо и Эль-Ниньо Модоки. Дис. канд. геогр. наук. – М., 264 с.

Железнова И.В., Гущина Д.Ю. 2015. Отклик глобальной циркуляции атмосферы на два типа Эль-Ниньо. – Метеорология и гидрология, №3, с. 36-50. Железнова И.В., Гущина Д.Ю. 2016. Аномалии циркуляции в центрах действия атмосферы в период восточно-тихоокеанского и центрально-тихоокеанского Эль-Ниньо. – Метеорология и гидрология, №11, с. 41-55.

Железнова И.В., Гущина Д.Ю. 2017. Аномалии циркуляции в ячейках Уокера и Хэдли в период развития двух типов Эль-Ниньо. – Метеорология и гидрология, №10, с. 8-21.

Мохов И.И., Смирнов Д.А., Наконечный П.И., Козленко С.С., Куртс Ю. 2012. Взаимосвязь явлений Эль-Ниньо/Южное колебание и индийского муссона. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 48, № 1, с. 56-66.

Петросянц М. А., Гущина Д. Ю. 2002. Об определении явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. – Метеорология и гидрология, №. 8, с. 24-35.

Семенов Е.К., Соколихина Е.В., Соколихина Н.Н. 2007. Вертикальная циркуляция в тропической атмосфере в периоды экстремальных событий явления Эль-Ниньо – Южное Колебание. – Метеорология и гидрология, №7, с. 17-28

Ashok K. et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. – Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 112 (11), pp. 1-27.

Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. – Mon. Wea. Rev., vol. 97, pp. 163-172.

Chen S., Wu R., Chen W., Yu B., Cao X. 2016. Genesis of westerly wind bursts over the equatorial western Pacific during the onset of the strong 2015–2016 El Niño. – Atmospheric Science Letters, vol. 17, pp. 384–391

Dewitte B. et al. 2002. On the importance of subsurface variability for ENSO simulation and prediction with intermediate coupled models of the Tropical Pacific: a case study for the 1997–1998 El Niño. – Geophysical research letters, vol. 29.

Dewitte B. et al. 2009. Low-frequency variability of temperature in the vicinity of the equatorial Pacific thermocline in SODA: Role of equatorial wave dynamics and ENSO asymmetry. – Journal of Climate, vol. 22, pp. 5783-5795.

Dewitte B. et al. 2012. Vertical structure variability and equatorial waves during Central Pacific and Eastern Pacific El Niños in a Coupled General Circulation Model. – Climate Dynamics., No 38, pp. 2275–2289.

Gushchina D., Dewitte B. 2011. The relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO and its modulation at seasonal to decadal timescales. – Central European Journal of Geosciences, vol. 3, pp. 175-196.

Gushchina D., Dewitte B. 2012. Intraseasonal tropical atmospheric variability associated with the two flavors of El Niño. – Monthly Weather Review, vol. 140, pp. 3669-3681.

Hendon H.H., Wheeler M.C., Zhang C. 2007. Seasonal dependence of the MJO–ENSO relationship. – Journal of Climate, vol. 20, pp. 531-543.

Hu S., Fedorov A.V. 2017. The extreme El Niño of 2015-2016: the role of westerly and easterly wind bursts, and preconditioning by the failed 2014 event. – Climate Dynamics. doi: 10.1007/s00382-017-3531-2.

Jacox M.G., Hazen E.L., Zaba K.D., Rudnick D.L., Edwards C.A., Moore A.M., Bograd, S.J. 2016. Impacts of the 2015–2016 El Niño on the California current system: Early assessment and comparison to past events. – Geophysical Research Letters, vol. 43(13), pp. 7072–7080.

Jiménez-Muñoz J.C., et al. 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. – Scientific Reports, vol. 6. doi: 10.1038/srep33130.

Jin F. F. 1997. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. – Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 54 (7), pp. 811-829.

Kao H. Y., Yu J. Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. – Journal of Climate, vol. 22(3), pp. 615-632.

Kug J. S., Choi J., An S. I., Jin F. F., and Wittenberg A. T. 2010. Warm pool and cold tongue El Niño events as simulated by the GFDL 2.1 coupled GCM. – Journal of Climate, vol. 23(5), pp. 1226-1239.

Levine A.F.Z., McPhaden M.J. 2016. How the July 2014 Easterly Wind Burst Gave the 2015-16 El Niño a Head Start. – Geophysical Research Letters, vol. 43, pp. 6503–6510.

L'Heureux M.L. et al. 2016 Observing and Predicting the 2015–16 El Niño. – Bulletin of American Meteorological Society, vol. 98, pp. 1363-1382.

McPhaden M.J., Zhang X., Hendon H.H., Wheeler M.C. 2006 Large scale dynamics and MJO forcing of ENSO variability. – Geophysical Research Letters, vol. 33, L16702. doi: 10.1029/2006GL026786

Mo K.C. 2010. Interdecadal modulation of the impact of ENSO on precipitation and temperature over the United States. – Journal of Climate, vol. 23, pp. 3639–3656.

Paek H., Yu J.-Y., Qian C. 2017. Why were the 2015/2016 and 1997/1998 extreme El Ninos different. – Geophysical Research Letters, vol. 44, pp. 1848–1856.

Puy M., Vialard J., Lengaigne M., Guilyardi E. 2016. Modulation of equatorial Pacific westerly/easterly wind events by the Madden–Julian oscillation and convectively-coupled Rossby waves. – Climate Dynamics, vol. 46, pp. 2155–2178.

Puy M., Vialard J., Lengaigne, M. et al. 2017. Influence of Westerly Wind Events stochasticity on El Niño amplitude: the case of 2014 vs. 2015. – Climate Dynamics, 1-20 (2017). doi: 10.1007/s00382-017-3938-9.

Ropelewski C. F., Halpert M. S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. – Monthly weather review, vol. 115(8), pp. 1606-1626.

Santoso A., McPhaden M.J., Cai W. 2017. The Defining Characteristics of ENSO Extremes and the Strong 2015/2016 El Niño. – Reviews of Geophysics, vol. 55(4), pp. 1079-1129.

Thirumalai K., DiNezio P N., Okumura Y. & Deser C. 2017. Extreme temperatures in Southeast Asia caused by El Niño and worsened by global warming. – Nature Communications, 8 (15531).

Trenberth K. E. et al. 1998. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. – Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 103, pp.14291-14324.

Wang C. 2002. Atmospheric circulation cells associated with the El Nino–Southern Oscillation. – Journal of Climate, vol. 15, pp. 399-419.

Wheeler M., Kiladis G.N. 1999. Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber–frequency domain. – Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 56, pp. 374-399.

Xue Y., Kumar A. 2016. Evolution of the 2015/16 El Niño and historical perspective since 1979. – Science China Earth Sciences, vol. 60, pp. 1572-1588.

Yeh S.W. et al. 2009. El Niño in a changing climate. – Nature, vol. 461(7263), pp. 511–570

Yu J.-Y., Zou Y., Kim S. T., Lee T. 2012. The changing impact of El Niño on US winter temperatures. – Geophysical Research Letters, vol. 39, L15702, doi:10.1029/2012GL052483

Yuan Y., Yang S. 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: focus on ENSO cycles. – Journal of Climate, vol. 25, pp. 7702-7722.

Статья поступила в редакцию: 16.05.2018 г.

После переработки: 28.06.2018 г.