DOI: 10.21513/2410-8758-2018-2-31-51

УДК 551.50

# ИЗМЕНЕНИЕ УДАЛЕННОГО ОТКЛИКА АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ВОСТОЧНО-ТИХООКЕАНСКОЕ И ЦЕНТРАЛЬНО-ТИХООКЕАНСКОЕ ЭЛЬ-НИНЬО В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРОЕКТА СМІР5 СО СЦЕНАРИЯМИ ГРУППЫ RCP)

И.В. Железнова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Кафедра метеорологии и климатологии, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские Горы, ГСП-1; *ijeleznova@gmail.com* 

Резюме. Исследованы изменения удаленного отклика атмосферной циркуляции на восточно-тихоокеанское и центрально-тихоокеанское Эль-Ниньо в будущем климате с использованием данных климатических моделей проекта CMIP5. По данным контрольного эксперимента (piControl) оценена способность моделей воспроизводить особенности удаленного отклика глобальной, региональной и вертикальной атмосферной циркуляции в период двух типов Эль-Ниньо. Для каждого из типов циркуляции для дальнейшего анализа выбрано 7-8 лучших моделей. Показано, что в условиях глобального потепления связь аномалий глобальной зональной циркуляции и циркуляции в центрах действия атмосферы в целом существенно ослабевает при Эль-Ниньо обоих типов. Для глобальной циркуляции более ярко это ослабление проявляется в годы центрально-тихоокеанского Эль-Ниньо. Тем не менее пространственная структура удаленного отклика (как глобального, так и регионального) по данным большинства моделей изменяется незначительно. В зональной вертикальной ячейке Уокера наиболее заметные циркуляционные аномалии в период двух типов Эль-Ниньо формируются в сценариях потепления климата RCP 4.5 и RCP 6.0. Они выражены в усилении аномального подъема воздуха над районами локализации аномалий температуры поверхности океана для каждого из типов Эль-Ниньо. Это соответствует ослаблению ячейки Уокера в период положительной фазы Эль-Ниньо-Южного колебания.

Ключевые слова. Эль-Ниньо, атмосферная циркуляция, центры действия атмосферы, ячейка Уокера, изменение климата, XXI век, климатические модели, СМІР5.

## CHANGES IN REMOTE RESPONSE OF THE ATMOSHERIC CIRCULATION ON THE EASTERN PACIFIC AND CENTRAL PACIFIC EL NIÑO UNDER GLOBAL CLIMATE WARMING (RESULTS OF CMIP5 EXPERIMENTS WITH THE RCP SCENARIOS)

#### I.V. Zheleznova

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology & Climatology, GSP-1, Leninskiye Gory, 119991, Moscow, Russia; *ijeleznova@gmail.com* 

Summary. Changes in remote response of the atmospheric circulation to the East Pacific and Central Pacific El Niño in future climates are analyzed using CMIP5 climate model data. The ability of models to describe the features of remote response of global, regional and vertical atmospheric circulation during El Niño of two types is estimated using control experiment (piControl) data. For each type of circulation, seven to eight best models are selected for further analysis. It is shown that the influence of anomalies of global zonal circulation and circulation in the centers of action of the atmosphere is substantially weakened due to El Niño of both types under global warming. For the global circulation, this weakening is more pronounced in the Central Pacific El Niño years. Nevertheless, the spatial structure of remote response (both global and regional) changes insignificantly according to data of the majority of models. In zonal vertical Walker cell, the most noticeable circulatory anomalies emerge under RCP 4.5 and RCP 6.0 scenarios during El Niño of both types. For each El Niño type, they are manifested in increase of anomalous air rise over areas with sea surface temperature anomalies. This corresponds to the Walker cell weakening during positive phase of El Niño -South Oscillation.

**Keywords**. El Niño, atmospheric circulation, atmospheric action centers, Walker cell, climate change, XXI century, climate models, CMIP5.

### Введение

Явление Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК) представляет собой наиболее заметную климатическую аномалию в системе тропический океан – глобальная атмосфера на межгодовых масштабах. Исследования последнего десятилетия (Ashock et al., 2007; Yeh et al., 2009; Lee and McPhaden, 2010; Takahashi et al., 2011) показали, что существуют два типа этого явления, различающиеся локализацией аномалий температуры поверхности океана (ТПО): в период канонического Эль-Ниньо максимум АТПО расположен на востоке экваториального Тихого океана, в случае Эль-Ниньо Модоки максимальный нагрев поверхностных вод смещен в центральную часть Тихого океана. Другие названия двух типов Эль-Ниньо – Восточно-Тихоокеанское (ВТ) и Центрально-Тихоокеанское (ЦТ) соответственно. Рост аномалий ТПО в период Эль-Ниньо сопровождается глобальной перестройкой атмосферной циркуляции как в тропических широтах, так и далеко за их пределами (Ashock et al., 2007, Weng et al., 2009). При этом характер и интенсивность циркуляционных аномалий во многих регионах может существенно отличаться для двух типов Эль-Ниньо. Различия отмечаются для глобальной зональной циркуляции, циркуляции в отдельных центрах действия атмосферы, а также в структуре вертикальных ячеек Уокера и Хэдли (Железнова, Гущина, 2015, 2016, 2017).

Для глобальной зональной циркуляции скорости ветра различия в отклике на два типа Эль-Ниньо связаны с особенностями распространения сигнала со временем (Железнова, Гущина, 2015). В обоих случаях наблюдается распространение сигнала из тропиков в высокие широты, но в годы ВТ Эль-Ниньо оно оказывается симметричным относительно экватора, тогда как в годы ЦТ Эль-Ниньо отмечается асимметричный отклик в Северном и Южном полушариях. Кроме того, для ЦТ Эль-Ниньо отмечаются большие абсолютные значения аномалий зональной циркуляции и теснота корреляционных связей, что обусловлено локализацией максимальных аномалий ТПО в центральных районах Тихого океана. Анализ различий в аномалиях глобальной циркуляции показал, что их причиной является разный отклик на два типа Эль-Ниньо отдельных центров действия атмосферы, вклад которых отражается на глобальной картине циркуляции.

Теснота связей с региональной атмосферной циркуляцией для ВТ Эль-Ниньо несколько выше в Северном полушарии, а для ЦТ Эль-Ниньо – в Южном. При ЦТ Эль-Ниньо отклик в атмосферной циркуляции проявляется раньше, чем при ВТ, однако эта тенденция наблюдается не для всех ЦДА. Существенные различия в характере отклика на два типа Эль-Ниньо отмечаются в ЦДА, входящих в систему PNA (Pacific North American Oscillation -Тихоокеанское Североамериканское колебание) – Гавайском и Канадском антициклонах, Алеутском минимуме и Мексиканской депрессии – а также для Южно-Тихоокеанского антициклона, экваториальных областей Атлантики, циклонов умеренных широт в южном Тихом океане и района распространения Индийского муссона. Значительная и сходная по характеру связь выявлена в экваториальных ложбинах Тихого и Индийского океанов (Железнова, Гущина, 2016).

Существенно различается и отклик на два типа Эль-Ниньо атмосферной циркуляции в вертикальной плоскости (Weng et al., 2009). Так, в годы ВТ Эль-Ниньо отмечается аномальный подъем воздуха в центральных и восточных регионах Тихого океана (180° до 100° з.д.) и нисходящие движения воздуха в районе Индонезии. В период ЦТ Эль-Ниньо формируется двойная ячейка Уокера: аномальные восходящие движения в центре экваториального Тихого океана (160° в.д. - 140° з.д.) и опускание воздуха на востоке и на западе Тихоокеанского региона. Наиболее ярко различия между двумя типами Эль-Ниньо в структуре ячейки Уокера вне Тихоокеанского региона проявляются на севере и западе Индийского океана, на востоке Африки, в районе Южной Америки и Карибского бассейна (Железнова, Гущина, 2017).

В условиях роста глобальной температуры воздуха в последние десятилетия актуальным представляется вопрос о реакции ЭНЮК на изменение климата. Однако серьёзной проблемой в исследованиях Эль-Ниньо в будущем климате является ряд неопределенностей в воспроизведении самого явления и удаленного отклика на него в климатических моделях, входящих в СМІР5. Так, примерно в половине моделей неверно воспроизводится частота возникновения и продолжительность Эль-Ниньо (Weare, 2013). Сложности возникают и с амплитудой аномалий ТПО в период ЭНЮК, а также с разделением двух типов явлений, особенно – с разделением двух типов Ла Нинья (Jian, Rong-Cai, 2014; Tachetto et al, 2014). Однако к наиболее значимым проблемам можно отнести систематические ошибки при воспроизведении климата экваториального Тихого океана и обратных связей в системе океан-атмосфера. Так, разброс аномалий ТПО в регионах Nino3 и Nino4 в разных моделях настолько велик, что пространственная структура ТПО в период развития Эль-Ниньо в одних моделях может соответствовать ТПО в годы Ла Нинья для других моделей (Latif et al., 2015). Нет определённости в оценках изменения градиента ТПО в Тихом океане даже по эмпирическим данным. Так, в (Vecchi, Soden, 2007) найдено ослабление циркуляции Уокера в течение XX веке, тогда как (Meng et al., 2012; L'Heureux et al, 2013) отмечают усиление зональной ячейки циркуляции в последние десятилетия.

Модельные оценки отклика характеристик Эль-Ниньо на изменение климата также зачастую оказываются противоположными: в одних исследованиях предполагается ослабление интенсивности Эль-Ниньо в будущем (Yeh et al., 2009; Kug et al, 2009), в других работах говорится об усилении экстремальных явлений (Cai et al, 2014). Рост глобальной температуры ряд исследователей считают возможной причиной более частого возникновения ЦТ Эль-Ниньо в последние десятилетия (например, Yeh et al., 2009).

Существуют предположения и о переходе климатической системы тропического Тихого океана в режим перманентного Эль-Ниньо на фоне общего потепления климата планеты (Vecchi, Soden, 2007). Такой режим подразумевает среднеклиматическое уменьшение градиента ТПО запад-восток и увелитемпературы, что сопровождается чение средней уменьшением интенсивности самих явлений ЭН. В (Мохов и Елисеев, 2012) показано, что при потеплении климата амплитуда как положительных, так и отрицательных аномалий ТПО, связанных с ЭНЮК, возрастает, при этом период цикла сокращается. В то же время согласно (Cai et al., 2014; Latif et al., 2015; Johnson, 2014; Ham et al., 2015) увеличивается повторяемость Эль-Ниньо в условиях глобального потепления. Отсутствие единого мнения относительно характера изменения ЭНЮК в условиях глобального потепления делает актуальным дальнейшее изучение этого вопроса.

Кроме того, основная часть работ, рассматривающих изменение ЭНЮК в будущем климате, сосредоточена на характеристиках самого явления, таких как частота, интенсивность, продолжительность, сезонность и др. (Матвеева, Гущина, 2017; Chen et al., 2017), тогда как исследованию изменений аномалий атмосферной циркуляции в период Эль-Ниньо уделяется существенно

меньше внимания. В рамках настоящей работы было проведено исследование изменения аномалий глобальной, региональной и вертикальной атмосферной циркуляции в условиях глобального потепления.

### Используемые данные и методы

Для расчета циркуляции скорости ветра использовались данные 16 климатических моделей, входящих в проект CMIP5 (BNU-ESM, CanESM2, CCSM4, CESM1-CAM5, CMCC-CM, CNRM-CM5, EC-EARTH, FIO-ESM, GFDL-CM3, GFDL-ESM2M, GISS-E2-H, INM-CM4, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MPI-ESM-LR и MRI-CGCM3) – для зональной, меридиональной компонент ветра (u, v) и для аналога вертикальной скорости ветра  $\omega$  на 12 вертикальных уровнях от 1000 до 100 гПа. Для получения индексов двух типов Эль-Ниньо использовались данные о ТПО по тем же моделям.

Валидация моделей проводилась на основании 100-летних рядов данных контрольного эксперимента (piControl) с доиндустриальным содержанием углекислого газа в атмосфере, что позволяет оценить базовую способность модели воспроизводить ключевые черты атмосферной циркуляции и ее связи с Эль-Ниньо. Оценка качества воспроизведения связей аномалий атмосферной циркуляции с двумя типами Эль-Ниньо заключалась в сопоставлении данных эксперимента piControl с результатами работ (Железнова, Гущина, 2015, 2016, 2017), основанными на данных реанализа NCEP/NCAR за период 1948-2012гг. (Kalnay E. et al., 1996) для составляющих скорости ветра и данных архива Хэдли центра (HadISST) (Rayner et al., 2003) для индексов двух типов Эль-Ниньо.

Оценка изменения структуры связей аномалий атмосферной циркуляции в период двух типов Эль-Ниньо вследствие роста глобальной температуры осуществлялась на основании четырех сценариев изменения климата в XXI веке (группа сценариев RCP – Representative Concentration Pathways) – RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 и RCP 8.5 (Van Vuuren et al., 2011). Для каждого из сценариев из полного ряда данных за XXI век были выбраны последние 30 лет (2071-2100гг.). Период был выбран таким образом, чтобы уменьшить влияние роста глобальной температуры в течение XXI века на полученные результаты. Кроме того, из модельных рядов ТПО был вычтен линейный тренд потепления.

Индексы интенсивности двух типов Эль-Ниньо (ЦТ и ВТ индексы) рассчитывались на основе данных о температуре поверхности Тихого океана. Для построения непрерывных рядов ЦТ и ВТ индексов использовался метод, описанный в (Takahashi et al., 2011). Сами индексы рассчитывались по формулам:

$$BT = \frac{PC1 - PC2}{\sqrt{2}},\tag{1}$$

$$LT = \frac{PC1 + PC2}{\sqrt{2}},\tag{2}$$

где PC1 и PC2 – временные ряды главных компонент при первых двух модах ЭОФ-разложения аномалий ТПО в тропическом Тихом океане.

Для анализа интенсивности циркуляции по кругу широты и по контурам, соответствующим центрам действия атмосферы, были использованы различные модификации индекса циркуляции Петросянца – Гущиной (Петросянц, Гущина, 1998; Гущина, Петросянц, 1998). Расчет индексов глобальной циркуляции проводился по формуле:

$$L_{\varphi} = \Phi_{l_{\varphi}} u(\varphi) dl_{\varphi}, \tag{3}$$

где  $u(\varphi)$  скорости зональной составляющей реального ветра, а  $\varphi$  - широта. Циркуляция в центрах действия *Ls* рассчитывалась по формуле :

$$L_{S} = \int_{\varphi_{1}} u_{\varphi_{1}} dl_{\varphi_{1}} + \int_{\lambda_{2}} v_{\lambda_{2}} dl_{\lambda_{2}} - \int_{\varphi_{2}} u_{\varphi_{2}} dl_{\varphi} - \int_{\lambda_{1}} v_{\lambda_{1}} dl_{\lambda_{1}}, \tag{4}$$

где *и* и *v* – зональная и меридиональная компоненты вектора скорости реального ветра,  $\varphi l$  и  $\varphi 2$  – широта южной и северной границ контура соответственно;  $\lambda l$  и  $\lambda 2$  – долгота западной и восточной границ контура соответственно; l – длина стороны контура. Положительное направление обхода при расчете циркуляции *Ls* – против часовой стрелки. Подробнее методика расчета индексов циркуляции изложена в (Железнова, Гущина, 2015, 2016)

Для оценки изменения структуры связей двух типов Эль-Ниньо с глобальной и региональной атмосферной циркуляцией рассчитаны кросскорреляционные функции между рядами среднемесячных значений аномалий циркуляции скорости ветра вдоль круга широты и в центрах действия атмосферы с индексами ЦТ и ВТ Эль-Ниньо со сдвигом до 24 месяцев (шаг по времени – один месяц). Отрицательные сдвиги означают, что аномалии циркуляции предшествуют изменениям индексов Эль-Ниньо, положительные соответствуют отклику атмосферной циркуляции на процессы в океане.

Значимость корреляционных связей оценивалась с помощью t-критерия Стьюдента с учетом автоскоррелированности временных рядов (см. Железнова, Гущина, 2016). Порог значимости для выборок в данных реанализа составляет |  $r \models 0.2$  для глобальной циркуляции (Железнова, Гущина, 2015) и находится в диапазоне 0.2-0.25 для контуров, соответствующих центрам действия атмосферы (Железнова, Гущина, 2016). В модельных данных он несколько выше, но в большинстве случаев не превышает 0.3. Теснота корреляции в данном исследовании интерпретируется не как параметр для статистического прогноза (для которого коэффициенты корреляции порядка 0.3-0.4 очень малы), а как мера интенсивности отклика атмосферной циркуляции на Эль-Ниньо. Анализ этих связей позволяет охарактеризовать скорость распространения сигнала, области, в пределах которых он распространяется, а также сравнить интенсивность отклика для двух типов Эль-Ниньо.

Для построения вертикальных ячеек Уокера использована дивергентная составляющая скорости горизонтального ветра, рассчитанная с использованием методики, предложенной в (Wang, 2002a, 2002b), и аналог вертикальной скорости  $\omega = dp/dt$ . Подробно методика построения ячеек описана в (Железнова, Гущина, 2017). Для построения ячейки Уокера данные осреднялись в полосе широт от 5° с.ш. до 5° ю.ш.

### Валидация моделей

Список моделей, использованных в работе, был определен в соответствии с работой (Матвеева, Гущина, 2017). В ней выделяется 16 моделей (табл. 1), способных разделять два различных типа Эль-Ниньо и воспроизводящие соотношение изменчивости ЭОФ1/ЭОФ2 близко к данным наблюдений. Среди выбранных моделей была проведена оценка способности воспроизведения аномалий глобальной, региональной и вертикальной атмосферной циркуляции в период развития ВТ и ЦТ Эль-Ниньо. Данные всех моделей были переинтерполированы на единую сетку с шагом 4°×3° для оценки воспроизведения глобальной и региональной циркуляции и с шагом 5°×5° для исследования воспроизведения аномалий циркуляции в вертикальной плоскости.

### Глобальная циркуляция

Для сравнения аномалий зональной атмосферной циркуляции в период двух типов Эль-Ниньо в моделях с реально наблюдающимися связями были использованы результаты аналогичных расчетов на основе реанализа NCEP/ NCAR, приведенные в (Железнова, Гущина, 2015). Были построены широтновременные разрезы коэффициента корреляции между индексом Петросянца-Гущиной для каждого широтного крута и индексами ЦТ и ВТ Эль-Ниньо (рис.1) и проанализирована способность моделей верно воспроизводить основные черты пространственного распределения отклика глобальной циркуляции на аномалии ТПО: распространение сигнала со временем в более высокие широты, более интенсивный отклик на ЦТ Эль-Ниньо по сравнению с откликом на ВТ Эль-Ниньо, положительные связи в тропических широтах в период кульминации явления. Указанным критериям соответствуют 8 моделей (BNU-ESM, CCSM4, CESM1-CAM5, CMCC-CM, FIO-ESM, GFDL-ESM-2M, MIROC5 и MPI-ESM-LR). Все они воспроизводят положительную корреляцию в тропических широтах обоих полушарий в период кульминации Эль-Ниньо, распространяющуюся в более высокие широты при увеличении временного сдвига, тогда как в тропиках положительные корреляции после кульсменяются отрицательными. минации Эль-Ниньо Это соответствует западным аномалиям ветра, ослабляющим пассаты в период Эль-Ниньо и усиливающим западный перенос умеренных широт через несколько месяцев после пика Эль-Ниньо. Кроме того, модели верно отражают более тесную

корреляционную связь аномалий зональной циркуляции с ЦТ Эль-Ниньо по сравнению с ВТ Эль-Ниньо, причиной которого является большая чувствительность атмосферы к воздействию со стороны океана на западе Тихоокеанского бассейна, куда смещена аномалия ТПО в период ЦТ Эль-Ниньо (Железнова, Гущина, 2016). Однако для всех моделей характерно упрощение структуры корреляционных связей по сравнению с данными реанализа и завышение абсолютных значений коэффициентов корреляции (рис. 1 б, в). Это, по-видимому, связано с тем фактом, что модели не воспроизводят всех существующих в реальной атмосфере процессов, формирующих сложную структуру удаленного отклика. Наиболее заметны упрощения в характере распространения отклика со временем в высокие широты, очень четко выраженные с модельных данных и имеющие более сложную структуру в данных реанализа. Это хорошо заметно при сравнении широтно-временных разрезов, построенных по данным реанализа (рис. 1а) и композиционного разреза для 8 указанных выше моделей (рис. 1 г). Тем не менее, адекватное воспроизведение ключевых особенностей дальних связей достаточно для дальнейшего использования этих моделей.



Рисунок 1. Кросс-корреляция между 13-месячным скользящим средним аномалий циркуляции скорости ветра вдоль круга широты на 200, 500 и 850 гПа и индексами ЦТ и ВТ Эль-Ниньо по данным реанализа (а), по (Железнова, Гущина, 2015), в некоторых моделях проекта СМІР5 (б,в,д,е) и среднее для 8 лучших моделей (г)

Примеры широтно-временных разрезов коэффициентов корреляции для моделей, неверно воспроизводящих важные черты отклика глобальной атмосферной циркуляции на два типа Эль-Ниньо, приведены на рис. 1 д, е. Так, в модели CNRM-CM5 практически не выражено распространение сигнала со временем в более высокие широты, а модель IPSL-CM5A-MR характеризуется более тесной корреляционной связью глобальной атмосферной циркуляции не в ЦТ, а с ВТ Эль-Ниньо.

### Региональная циркуляция

Для оценки взаимодействия двух типов Эль-Ниньо с региональной атмосферной циркуляцией были выбраны 10 центров действия атмосферы (ЦДА), в которых отмечается значительный отклик на два типа Эль-Ниньо по данным реанализа (Железнова, Гущина, 2016). Часть из этих ЦДА для удобства анализа была разделена на две части (например, северная и южная части экваториальных депрессий характеризуются противоположным направлением преобладающей циркуляции скорости ветра, поэтому их целесообразно рассматривать по отдельности). Таким образом, было проанализировано 15 контуров (рис. 2). Их координаты определялись отдельно для каждой модели по среднемноголетним полям давления на уровне моря и геопотенциальной высоты на изобарических поверхностях от 925 до 200 гПа, исходя из предположения, что вдоль всей границы контура должна сохраняться циркуляция одного знака, при этом выбирался максимально возможный диаметр контура. В различных экспериментах, реализованных в одной модели, как показал анализ, различия в координатах ЦДА незначительны.



Рисунок 2. Контуры центров действия атмосферы, рассматриваемые в работе 1 а и б - Экваториальная ложбина севера и юга Тихого океана, 2 а и б - Гавайский антициклон (западная и восточная части), 3- Алеутская депрессия, 4 а и б - Южнотихоокеанский антициклон (западная и восточная части), 5 - Циклоны южного Тихого океана, 6 а и б - Экваториальная ложбина севера и юга Индийского океана, 7 - Маскаренский антициклон, 8 а и б Экваториальная ложбина севера и юга Атлантического океана, 9 - Мексиканская депрессия, 10 - Канадский антициклон

Примеры сравнения модельных значений корреляции с данными реанализа NCEP/NCAR для некоторых контуров приведены на рис. 3. Большинство моделей неплохо воспроизводят общий вид кросскорреляционной функции, но, как и для глобальной циркуляции, часто существенно завышают абсолютные значения максимальных коэффициентов корреляции. Кроме того, нередко отмечается смещение временного сдвига, при котором значения коэффициента корреляции максимальны (например, рис. 3 в). В то же время, несколько моделей (наиболее ярко это выражено для модели СМСС-СМ) вообще не воспроизводят наличие корреляционных связей между аномалиями циркуляции в центрах действия атмосферы и индексами двух типов Эль-Ниньо.



Рисунок 3. Кросс-коррелляционная функция между индексами циркуляции скорости ветра (м<sup>2</sup>/с) в некоторых ЦДА и индексами ЦТ и ВТ Эль-Ниньо по данным реанализа (черная пунктирная линия, по (Железнова, Гущина, 2016)) и по данным моделей эксперимента СМІР5

Для выделения моделей, наиболее точно воспроизводящих связи между аномалиями региональной атмосферной циркуляции и двумя типами Эль-Ниньо, была проведена оценка ошибок в воспроизведении вида кросскорреляционной функции по данным моделей. При этом вес ошибки принимался за единицу для синхронной корреляции и линейно уменьшался по мере увеличения сдвига. Кроме того, учитывалось абсолютное значение коэффициента корреляции при каждом сдвиге. Это позволило в первую очередь учесть способность моделей верно воспроизводить корреляционные связи при небольших сдвигах и значительных коэффициентах корреляции, т.е. наиболее важные особенности отклика региональной циркуляции на Эль-Ниньо. Анализ показал, что 7 моделей (CCSM4, CESM1-CAM5, GFDL-CM3, GFDL-ESM-2M, IPSL-CM5A-MR, MIROC5 и MRI-CGCM3) достаточно адекватно воспроизводят корреляционные связи между индексами двух типов Эль-Ниньо и циркуляцией в ЦДА.

Была также проведена оценка способности выделенных моделей воспроизводить абсолютные значения циркуляции скорости ветра в центрах действия атмосферы. Для большинства регионов модели верно воспроизводят знак и порядок величины циркуляции (не показано).

### Вертикальная циркуляция

Наиболее яркой чертой аномалий в вертикальной плоскости в период развития двух типов Эль-Ниньо по данным реанализа являются нарушения в структуре циркуляции зональной ячейки Уокера в экваториальной зоне Тихого океана: возникновение восходящих аномалий вертикальной скорости в восточной и центральной (для ВТ Эль-Ниньо) и в центральной (для ЦТ Эль-Ниньо) частях экваториального Тихого океана и мощное аномальное опускание воздуха над Индонезией (Железнова, Гущина, 2017; Weng, 2009).

Для проверки воспроизведения в моделях этой особенности были проанализированы временные ряды индексов двух типов Эль-Ниньо за 100-летний период по данным контрольного эксперимента и для каждой модели выделены по 5 случаев ЦТ и ВТ Эль-Ниньо. Для каждого случая Эль-Ниньо рассчитаны аномалии дивергентной составляющей зональной компоненты ветра (*u*) и аналога вертикальной скорости ветра  $\omega = dp/dt$ ) на 12 изобарических поверхностях от 1000 до 100 гПа, осредненные за трехмесячный период кульминации явления (рис. 4).

Пространственная структура аномалий в ячейке Уокера, характерных для периода кульминации ВТ и ЦТ Эль-Ниньо (рис. 4 а), неплохо воспроизводится в 7 моделях (GFDL-ESM-2M, MIROC5, CESM1-CAM5, CCSM4, BNU-ESM, CNRM-CM5 и CanESM2 (рис. 4 в, д). Композиционный разрез вдоль экватора по данным этих 7 моделей приведен на рис 4 б.





по данным реанализа (a), по (Железнова, Гущина, 2017), в некоторых моделях проекта СМІР5 (в,г,д,е) и среднее для 7 лучших моделей (б). Стрелки – вектора аномалий скорости (м/с по горизонтали, Па/с×10<sup>-2</sup> по вертикали), цветное поле – величина аналога вертикальной скорости ветра, взятая с обратным знаком (Па/с×10<sup>-2</sup>)

Можно отметить верную локализацию ключевых областей аномального подъема воздуха для двух типов Эль-Ниньо в Тихом океане (хотя модели заметно завышают абсолютные значения аномалий аналога вертикальной скорости, особенно для ВТ Эль-Ниньо) и заметное сглаживание менее выраженных аномалий вертикальной циркуляции вне Тихоокеанского региона. Кроме того, по данным реанализа более интенсивные аномалии аналога вертикальной скорости отмечаются в период ЦТ Эль-Ниньо. Однако все модели воспроизводят более интенсивные аномалии в период ВТ Эль-Ниньо. Возможно, это связано с большими по абсолютным значениям аномалиям ТПО в период этого типа явления.

В моделях, недостаточно верно воспроизводящих структуру аномалий в ячейке Уокера, отмечается изменение локализации аномального подъема или опускания воздуха, изменение общей структуры аномалий (рис. 4 г), а в ряде случаев даже интенсивные аномалии противоположного знака (рис. 4 е).

Комплексный анализ показал, что модели с различной степенью успешности воспроизводят те или иные черты аномалий атмосферной циркуляции в период двух типов Эль-Ниньо. Однако для каждого из рассмотренных типов связей можно выделить 7-8 моделей, достаточно реалистично воспроизводящих их ключевые черты. Модели, выбранные для дальнейшего анализа каждого из аспектов атмосферной циркуляции в условиях изменения климата в XXI веке, указаны в табл. 1. Среди них можно выделить четыре наиболее «успешных» модели CESM1-CAM5, CCSM4, GFDL-ESM-2M и MIROC5, хорошо себя проявившие при выявлении взаимосвязей двух типов Эль-Ниньо с аномалиями глобальной, региональной и вертикальной атмосферной циркуляции.

Модель	Реалистичное воспроизведение связей двух типов Эль-Ниньо с:		
	глобальной циркуляцией	региональной циркуляцией	вертикальной циркуляцией
BNU-ESM	+	-	+
CanESM2	-	-	+
CCSM4	+	+	+
CESM1-CAM5	+	+	+
CMCC-CM	+	-	-
CNRM-CM5	-	-	+
EC-EARTH	-	-	-
FIO-ESM	+	-	-
GFDL-CM3	-	+	-
GFDL-ESM2M	+	+	+
GISS-E2-H	-	-	-
INM-CM4	-	-	-
IPSL-CM5A-MR	-	+	-
MIROC5	+	+	+
MPI-ESM-LR	+	-	-
MRI-CGCM3	-	+	_

Таблица 1. Результаты валидации моделей проекта СМІР 5, способных разделять два типа Эль-Ниньо

### Изменение отклика атмосферной циркуляции на два типа Эль-Ниньо в условиях потепления климата в XXI веке

Для анализа изменения характеристик удаленного отклика атмосферной циркуляции на два типа Эль-Ниньо в условиях роста глобальной температуры были использованы данные экспериментов группы RCP (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 и RCP 8.5). Цифровой индекс экспериментов соответствует значению роста радиационного форсинга в Bт/м<sup>2</sup> по сравнению с доиндустриальным уровнем (Van Vuuren et al., 2011).

### Глобальная циркуляция

Для оценки отклика глобальной атмосферной циркуляции были рассчитаны кросс-корреляционные функции между индексами ЦТ и ВТ Эль-Ниньо и аномалиями зональной составляющей скорости ветра и построены широтно-временные разрезы для 8 моделей (см. табл. 1) и каждого сценария изменения климата на уровнях 200, 500 и 850 гПа. Затем были получены композиционные разрезы, приведенные на рис. 5 для поверхности 500 гПа.



Рисунок 5. Кросс-корреляция между 13-месячным скользящим средним аномалий циркуляции скорости ветра вдоль круга широты на изобарической поверхности 500 гПа и индексами ЦТ и ВТ Эль-Ниньо

по данным 8 моделей (см. табл. 1) экспериментов pi Control и RCP (слева) и разность между контрольным экспериментом и экспериментами группы RCP (справа). Редкой штриховкой обозначены области, где значения коэффициента корреляции уменьшаются более, чем на 50%, частой штриховкой – более, чем на 100%

Стоит отметить, что пространственно-временная структура отклика глобальной атмосферной циркуляции на два типа Эль-Ниньо в условиях потепления климата неодинаково воспроизводится различными моделями. Тем не менее, в большей части моделей (CCSM4, GFDL-ESM2M, MIROC5, CMCC-CM) сохраняются основные черты структуры дальних связей при существенном уменьшении абсолютных значений максимальных коэффициентов корреляции. По мере увеличения «жесткости» сценария сокращается время существования отклика (более чем в 2 раза сокращается зона положительных корреляций в тропических широтах в период кульминации явления) и ослабляется распространение сигнала в высокие широты. В то же время, согласно модели CESM1-CAM5, происходит полная перестройка структуры сигнала (не показано). Кроме того, согласно полученным результатам, существенно большее ослабление корреляционных связей с глобальной циркуляцией атмосферы будет происходить в годы ЦТ Эль-Ниньо по сравнению с ВТ. Так, если в контрольном эксперименте максимальные коэффициенты корреляции в случае ЦТ Эль-Ниньо превышали аналогичные показатели для ВТ Эль-Ниньо примерно на треть (0.68 и 0.45 соответственно для поверхности 500 гПа), то в сценарии RCP 8.5 эти величины уже сопоставимы и близки к границе значимости (0.29 и 0.33 соответственно). Существенно большее ослабление корреляционных связей в годы ЦТ Эль-Ниньо хорошо видно и по разностям между разрезами для контрольного эксперимента и экспериментов с потеплением климата (рис. 5). Глобальный рост температуры, таким образом, согласно модельным данным, приведет к сильному ослаблению удаленного отклика зональной атмосферной циркуляции.

## Региональная циркуляция

Для исследования изменения взаимосвязи региональной атмосферной циркуляции с двумя типами Эль-Ниньо на первом этапе была проведена оценка средних значений циркуляции скорости ветра в центрах действия атмосферы в различных сценариях потепления климата. Полученные значения для изобарической поверхности 500 гПа приведены на рис. 6.



**Рисунок 6.** Циркуляция скорости ветра в центрах действия атмосферы по данным 7 лучших моделей в контрольном эксперименте и экспериментах группы RCP

Модели не выявляют существенных изменений в структуре атмосферной циркуляции в большинстве рассматриваемых ЦДА в период Эль-Ниньо. Так, знак и порядок величины циркуляции скорости ветра почти во всех регионах сохраняется (кроме контуров с небольшими абсолютными значениями циркуляции скорости ветра, например, 1а, 6а, 6б, 8а), а абсолютные значения меняются в среднем на 10-20%. Существенное усиление циркуляции наблюдается только в контуре 16 (на 54% в сценарии RCP 8.5), ослабление – в контуре 10 (на 35% в сценарии RCP 6.0). Важно отметить, что сильных изменений не выявлено для осредненных значений, оценка экстремальных величин не входила в задачи данной работы. Следующим этапом стала непосредственно оценка отклика циркуляции скорости ветра в центрах действия атмосферы в период двух типов Эль-Ниньо в средней тропосфере. Стоит отметить, что многие модели, неплохо воспроизводя саму циркуляцию скорости ветра в ЦДА, не могут реалистично воспроизвести особенности её корреляционных связей с индексами двух типов Эль-Ниньо в ряде регионов, что хорошо проявляется при анализе композиционных кросскорреляционных функций (рис. 7). В первую очередь это справедливо для регионов, где невелики абсолютные значения циркуляции скорости ветра или они меняют свой знак в течение года. Это области экваториальных ложбин во всех океанах (контуры 1, 6, 8) в средней и верхней тропосфере (близко к данным реанализа воспроизводится только связь на поверхности 850 гПа, для Индийского океана также на 500гПа), восток Гавайского антициклона (контур 26) и регион над Мексиканской депрессией в верхней тропосфере (контур 10).

Рассмотрим особенности изменения отклика на два типа Эль-Ниньо в некоторых ЦДА. В Южно-Тихоокеанском антициклоне (контур 4) в годы ВТ Эль-Ниньо прогнозируется усиление положительных корреляционных связей в западной части контура, что соответствует более выраженному ослаблению антициклонической циркуляции. Кроме того, временные сдвиги максимальных значений коэффициентов корреляции смещаются в область отрицательных значений. То есть, ослабление западной части Южно-Тихоокеанского антициклона будет начинаться раньше на 2-5 месяцев в зависимости от сценария потепления. Небольшое (1-3 месяца) смещение сдвига максимальной корреляции в годы ВТ Эль-Ниньо наблюдается и для циркуляции в восточной части антициклона.

Таким образом, согласно полученным результатам, ослабление Южно-Тихоокеанского антициклона, приводящее к тому, что индекс Южного Колебания принимает отрицательные значения, будет наблюдаться в более ранние сроки, а не почти синхронно с пиком аномалий ТПО. Для ЦТ Эль-Ниньо сдвиг максимальных коэффициентов корреляции в контуре, напротив, отмечается в сторону положительных значений. В сценариях потепления климата максимальное ослабление антициклонической циркуляции вследствие роста ТПО на востоке Южно-Тихоокеанского антициклона наблюдается через 2-4 месяца после кульминации Эль-Ниньо. На западе региона модели в контрольном эксперименте не совсем точно воспроизводят величину сдвига, при котором наблюдается максимальная корреляционная связь (-1 вместо -3 месяцев) и этот сдвиг практически сохраняется в сценариях группы RCP (рис. 7), при этом абсолютные значения коэффициентов корреляции существенно сокращаются (с 0.55 в контрольном эксперименте до 0.33 в RCP 8.5).



Рисунок 7. Кросскоррелляционная функция между индексами циркуляции скорости ветра (м²/с) в ЦДА и индексами ЦТ и ВТ Эль-Ниньо

по данным эксперимента pi Control (черная линия), и группы экспериментов RCP (цветные линии). Среднее для 7 лучших моделей эксперимента CMIP5. Черная пунктирная линия – данные реанализа

В сценариях группы RCP исчезает слабая связь в Алеутской депрессии (контур 3), выражавшаяся в усилении циклонической циркуляции через 3-6 месяцев после кульминации ВТ Эль-Ниньо. Величина максимальных коэффициентов корреляции оказывается ниже порога значимости (0.21 в сценарии RCP 8.5). Аналогичное исчезновение связи наблюдается в зоне циклонов умеренных широт юга Тихого океана (контур 5) в годы ЦТ Эль-Ниньо, где по данным реанализа отмечается ослабление циклонической циркуляции за 3 месяца до кульминации явления (коэффициент корреляции -0.42 в эксперименте piControl и -0.15 в RCP 8.5). В области Канадского антициклона (контур 9) в годы обоих типов Эль-Ниньо по данным моделирования теснота корреляционной связи, соответствующая усилению циклонической циркуляции через 3 месяца после кульминации, также уменьшается, но для большинства сценариев остается значимой. Кроме того, для ЦТ Эль-Ниньо модели увеличивают сдвиг максимальных корреляционных связей до 5-6 месяцев.

Таким образом, общей особенностью для большинства рассматриваемых центров действия атмосферы в условиях роста глобальной температуры является ослабление тесноты корреляционных связей, неравномерно происходящее от сценария к сценарию, и часто увеличение временного сдвига максимальной корреляционной связи атмосферной циркуляции и аномалий ТПО в Тихом океане.

### Циркуляция в вертикальной плоскости

Оценка изменения отклика циркуляции в ячейке Уокера в условиях потепления климата была проведена на основе данных 7 моделей (таблица 1), реалистично воспроизводящих локализацию основных областей восходящих и нисходящий аномалий вертикальной скорости в контрольном эксперименте. На их основании были получены композиционные разрезы вдоль экватора (в полосе от 5° с.ш. до 5° ю.ш.) для всех сценариев группы RCP (рис. 8). Согласно полученным результатам, общая структура аномалий циркуляции в ячейке Уокера в период двух типов Эль-Ниньо не претерпит кардинальных изменений в условиях роста глобальной температуры. Однако модели прогнозируют смещение к западу области локализации максимального подъема воздуха для Центрально-Тихоокеанского Эль-Ниньо с 170-180° в. д. до 150-160° в. д.



Рисунок 8. Композиционные разрезы аномалий циркуляции в ячейке Уокера в период развития ВТ и ЦТ Эль-Ниньо

по данным эксперимента piControl и группы экспериментов RCP (среднее для 7 лучших моделей). Стрелки – вектора аномалий скорости (м/с по горизонтали, Па/с×10<sup>-2</sup> по вертикали), цветное поле – величина аналога вертикальной скорости ветра, взятая с обратным знаком (Па/с×10<sup>-2</sup>)

В прогнозировании аномалий циркуляции в вертикальной плоскости наблюдается довольно заметный межмодельный разброс значений, который приводит к сглаживанию результатов при композиционном анализе. Так, например, в модели GFDL-ESM2M область аномального подъема воздуха

смещается на запад не только в период ЦТ, но и ВТ Эль-Ниньо. Абсолютные значения максимальных аномалий аналога вертикальной скорости в разных моделях могут различаться в несколько раз (в контрольном эксперименте для ВТ Эль-Ниньо максимальная аномалия  $\omega$  в модели CanESM2 составляет 2.5 Па/с, в CESM1-CAM5 – 6.6 Па/с, а в GFDL-ESM2M – 9.0 Па/с).

Тем не менее, можно отметить, что в сценариях группы RCP возрастают аномалии аналога вертикальной скорости ветра над областью положительных аномалий TПО, что соответствует ослаблению циркуляции в ячейке Уокера. Наиболее значительные изменения для ВТ Эль-Ниньо отмечается в сценарии RCP 6.0: максимальная положительная аномалия вертикальной скорости составляет 5.9 Па/с (в контрольном эксперименте – 3.7 Па/с). В годы ЦТ Эль-Ниньо наибольшие значения аномалий аналога вертикальной скорости наблюдаются для сценария RCP 4.5 – 4.0 Па/с (в эксперименте piControl – 3.4 Па/с). Но для наиболее «жесткого» сценария потепления климата RCP 8.5 значения аномалий вертикальной скорости оказываются сопоставимы с данными контрольного эксперимента (3.5 и 2.7 Па/с для ВТ и ЦТ Эль-Ниньо соответственно). Полученные результаты могут свидетельствовать о нелинейности отклика вертикальной циркуляции атмосферы на Эль-Ниньо и требует дальнейших исследований.

#### Заключение

На основе климатических моделей, входящих в проект CMIP5, было проанализировано изменение интенсивности и пространственной структуры взаимосвязи двух типов Эль-Ниньо с глобальной и региональной атмосферной циркуляцией, а также с циркуляцией в вертикальной плоскости в условиях изменения климата в XXI веке. На основе данных эксперимента piControl для каждого типа циркуляции было выделено 7-8 моделей, реалистично воспроизводящие ключевые черты отклика на каждый из типов Эль-Ниньо. На их основе было проанализировано изменение дальних связей циркуляции атмосферы с Эль-Ниньо во всех сценариях изменения климата группы RCP.

Одним из наиболее важных выявленных изменений является ослабление тесноты корреляционных связей между глобальной и региональной циркуляцией и обоими типами Эль-Ниньо. При этом для глобальной циркуляции более ярко это ослабление проявляется в годы ЦТ Эль-Ниньо. Уменьшается также выраженность распространения сигнала со временем в более высокие широты. При этом пространственная структура отклика (как глобального, так и регионального) по данным большинства моделей изменяется незначительно. Хотя в ряде центров действия атмосферы увеличивается временной сдвиг максимальной корреляционной связи с Эль-Ниньо, в других максимальные значения коэффициента корреляции оказываются ниже границы значимости или близки к ней, что говорит об уменьшении влияния Эль-Ниньо на аномалии атмосферной циркуляции в условиях роста глобальной температуры.

В вертикальной ячейке Уокера наиболее заметные аномалии в период ЦТ и ВТ Эль-Ниньо формируются в промежуточных по «жесткости» сценариях

потепления климата RCP 4.5 и RCP 6.0. Они выражены в заметном усилении аномального подъема воздуха над районами локализации аномалий TПО для каждого из типов Эль-Ниньо. Это соответствует еще большему, чем в современном климате, ослаблению ячейки Уокера в период положительной фазы ЭНЮК. В наиболее «мягком» и «жестком» сценариях группы RCP аномалии циркуляции в вертикальной плоскости сопоставимы с результатами контрольного эксперимента. Кроме того, в годы ЦТ Эль-Ниньо модели прогнозируют смещение зоны максимальных аномалий вертикальной скорости к западу на 20-30° широты.

### Благодарности

Исследование было выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов №16-35-00394, №15-05-06693.

## Список литературы

Гущина Д.Ю., Петросянц М.А. 1998. О связи температуры поверхности экваториального Тихого океана с циркуляцией скорости ветра в центрах действия атмосферы. – Метеорология и гидрология, № 12, с. 5-15.

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.

Матвеева Т.А., Гущина Д.Ю. 2017 Изменения характеристик центральнотихоокеанского и восточно-тихоокеанского Эль-Ниньо в условиях потепления климата (по результатам экспериментов RCP 2.6 и RCP 8.5 CMIP5). – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 2, с. 86-110.

Мохов И.И., Елисеев А.В. 2012. Моделирование глобальных климатических изменений в XX-XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP. – Доклады Академии наук, т. 443, № 6, с. 732-736.

Пановский Г.А., Брайер Г.В. 1972. Статистические методы в метеорологии. – Л., Гидрометеоиздат, 188 с.

Петросянц М. А., Гущина Д. Ю. 1998. Крупномасштабное взаимодействие глобальной циркуляции атмосферы с температурой поверхности экваториальной части Тихого океана. – Метеорология и гидрология, №5, с. 5-24.

Петросянц М.А., Гущина Д.Ю. 2000. Об оптимальном масштабе взаимодействия между температурой поверхности экваториального Тихого океана и циркуляцией вектора скорости ветра вдоль кругов широты и в центрах действия атмосферы. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, № 10, с. 5-15.

Самарский А.А. 1983. Теория разностных схем. — М., Наука

Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. – J. Geophys. Res., vol. 112, C11007, doi:https://doi.org/10.1029/2006JC003798.

Cai W. et al. 2014. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. – Nature climate change, vol. 4 (2), pp. 111 - 116.

Chen, C., et al. 2017. ENSO in the CMIP5 Simulations: Life Cycles, Diversity, and Responses to Climate Change. – Journal of Climate, vol. 30 (2), pp. 775-801, doi:10.1175/JCLI-D-15-0901.1.

Ham Y.G., Jeong Y., Kug J.S. 2015. Changes in Independency between Two Types of El Niño Events under a Greenhouse Warming Scenario in CMIP5 Models. – Journal of Climate, vol. 28 (19), pp. 7561 - 7575.

Jian R., Rong-Cai R. 2014. Statistical Characteristics of ENSO Events in CMIP5 Models. – Atmospheric and Oceanic Science Letters, 7:6, pp. 546-552. doi: 10.3878/AOSL20140055.

Johnson N.C. 2014. Atmospheric science: A boost in big El Nio. – Nature Climate Change, vol. 4 (2), pp. 90 - 91.

Kalnay E. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., vol. 77, pp. 437—471.

Kug J. S., Jin F. F., and An S. L. 2009. Two types of El Nino events: Cold tongue El Nino and warm pool El Nino. – J. Clim., vol. 22, pp. 1499–1515.

L'Heureux M.L., Lee S., Lyon B. 2013. Recent multidecadal strengthening of the Walker circulation across the tropical Pacific. – Nature Climate Change, vol. 3 (6), pp. 571 - 576.

Latif M., Semenov V.A., Park W. 2015. Super El Nios in response to global warming in a climate model. – Climatic Change, vol. 132 (4), pp. 489 - 500.

Lee T., McPhaden M.J. 2010. Increasing intensity of El Nino in the central-equatorial Pacific. – Geophysical Research Letters, vol. 37 (14), L14603.

Meng, Q., Latif, M., Park, W. et al. 2012. – Clim Dyn. 38: 1757. doi:10.1007/s00382-011-1047-8.

Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. — J. Geophys. Res., vol. 108, No. D14, p. 4407; doi: 10.1029/2002JD002670.

Taschetto A. S., Gupta A. S., Jourdain N. C. et al. 2014. Cold tongue and warm pool ENSO Events in CMIP5: mean state and future projections. – Journal of Climate, vol. 27, No. 8, pp. 2861–2885.

Takahashi K., Montecinos A., Goubanova K. and Dewitte B. 2011. ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki El Nino. – J. Geophys. Res., vol. 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364.

Van Vuuren D.P. et al. 2011. The representative concentration pathways: an overview. – Climatic change, vol. 109, pp. 5 - 31.

Vecchi G.A., Soden B.J. 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation. – Journal of Climate, vol. 20 (17), pp. 4316 - 4340.

Wang, C. 2002a Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-Southern Oscillation. – J. Climate, vol. 15, pp. 399-419.

Wang, C. 2002b. Atlantic climate variability and its associated atmospheric circulation cells. – J. Climate, vol. 15, pp. 1516-1536.

Weare, B. C. 2013. El Niño teleconnections in CMIP5 models. –Climate Dyn., 41, 2165–2177, doi: https://doi.org/10.1007/s00382-012-1537-3.

Weng H., Behera S. K. and Yamagata T. 2009. Anomalous winter climate conditions in the Pacific Rim during recent El Nino Modoki and El Nino events. - Clim. Dyn., vol. 32, pp. 663–674.

Yeh S.W., Kug J.S., Dewitte B. et al. 2009. El Niño in a changing climate. – Nature, vol. 461, pp. 511-514, doi:10.1038/nature08316.

Статья поступила в редакцию: 08.12.2017 г.

После переработки: 05.03.2018 г.