

О ДИНАМИКЕ И СТРУКТУРЕ ГЛОБАЛЬНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ И РЕАЛЬНОСТИ

И.В. Серых

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: iserykh@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 28.02.2018, одобрена к печати 26.04.2018

По данным наблюдений и их ре-анализам, а также результатам экспериментов с климатическими моделями построены глобальные поля средних аномалий атмосферного давления на уровне моря и температуры воздуха у поверхности на положительных и отрицательных фазах недавно выявленной российскими учеными Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО), чьими элементами являются Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Предложен индекс ГАО и рассчитаны его спектры, а также спектры индексов Эль-Ниньо – Южного колебания. Показано, что некоторые из современных моделей совместной циркуляции океана и атмосферы, участвующие в международном проекте сравнения моделей CMIP5, неплохо воспроизводят пространственную структуру ГАО. Что касается временных энергетических спектров, то у моделей они отличаются от реальности как общим ходом спектральной плотности в диапазоне междугодовых – десятилетних колебаний, так и периодами конкретных пиков, имеющих место в этом диапазоне. Сравнение модельных экспериментов piControl и Historical показало, что при учете 11-летнего цикла солнечной активности климатические модели воспроизводят периодичности ГАО точнее, чем без него. Сделан вывод, что отличия модельных спектров от реальных являются причиной ошибок в предсказаниях начала Эль-Ниньо с заблаговременностью более полугодия.

Ключевые слова: Глобальная атмосферная осцилляция, Эль-Ниньо, Ла-Нинья, данные наблюдений, ре-анализы, совместные модели общей циркуляции океана и атмосферы, энергетические спектры, 11-летний цикл солнечной активности, чандлеровское колебание

Введение

Одним из наиболее известных явлений, наблюдаемых в системе океан – атмосфера, является Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). ЭНЮК развивается в узкой приэкваториальной полосе Тихого океана, т.е. формально является региональным явлением. Вместе с тем, общепринято считать, что ЭНЮК оказывает свое воздействие на гидрометеорологические процессы междугодовых – десятилетних временных масштабов повсеместно на Земле. Этому обстоятельству посвящены бесчисленные публикации в отечественной и, особенно, зарубежной литературе (Voskresenskaya and Polonsky, 1993; McPhaden et al., 2006; Peng et al., 2014). Сейчас с констатацией глобальной важности ЭНЮК появляется не менее десятка статей ежегодно.

Несколько лет назад исследователи из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Бышев и др., 2012а, б) предположили, что существует Глобальная атмосферная осцилляция (ГАО), на экстремальных фазах которой развиваются события Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Иначе говоря, эти авторы предположили, что первичным является совокупное взаимодействие гидрометеорологических процессов, происходящих всюду на Земле, а ЭНЮК есть наиболее выраженное проявление этих процессов.

Чтобы выявить ГАО, были рассмотрены и сопоставлены глобальные поля давления на уровне моря (ДУМ), соответствующие 10 наиболее сильным Эль-Ниньо и Ла-Нинья, из числа имевших место в 1950–2010 годах. На их основе было построено среднее поле разностей между полями ДУМ, имевшими место при Эль-Ниньо и при Ла-Нинья. Главной особенностью среднего поля разностей оказалось наличие обширной положительной области ДУМ, которая в зональном направлении простирается вдоль экватора от района Индонезии через Индийский океан, Африку и Атлантику вплоть до побережья Бразилии, а в меридиональном направлении ограничена с севера и юга 30° северной и южной широты. Со всех сторон эту область опоясывают узкие ленты отрицательных значений разности ДУМ. Они сливаются и усиливаются по модулю в центре и на востоке Тихого океана, пересекаясь в каноническом районе развития Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В приполярных областях обоих полушарий значения разности ДУМ опять становятся положительными. Наиболее выраженный очаг положительных значений ДУМ располагается к юго-западу от Южной Америки, где уже до этого некоторые исследователи (Peterson and White, 1998; Romanov et al., 2008) находили развитие мощного антициклона одновременно с развитием Эль-Ниньо.

Поскольку число событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, использованных для построения средних полей разностей в работах (Бышев и др., 2012а, б) было весьма невелико, возникло сомнение в статистической значимости средних полей разностей ДУМ и, следовательно, реальности ГАО. Поэтому в работе (Бышев и др., 2016) расчет среднего глобального поля разностей ДУМ между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья был выполнен заново с использованием большего числа этих событий (23 и 25), имевших место в 1920–2012 годах. И главное, для обеих групп событий были подсчитаны глобальные поля среднеквадратических отклонений ДУМ от средних полей, соответствующих Эль-Ниньо и Ла-Нинья по отдельности. Используя эти среднеквадратические отклонения для каждого узла географической сетки, покрывающей всю Землю, были вычислены значения *t*-теста Стьюдента, показавшие, что очаги положительных и отрицательных разностей ДУМ, видимые в пространственной структуре ГАО, являются высоко значимыми (на уровне 95% и даже более). Тем самым было доказано, что ГАО реально существует.

Встал вопрос, воспроизводят ли ГАО современные модели совместной циркуляции океана и атмосферы, при том, что они воспроизводят многие черты наблюдаемой межгодовой изменчивости в тропиках Тихого океана (Володин и Дианский, 2004). Сравнение временных энергетических спектров индексов ЭНЮК,

рассчитанных по данным наблюдений, со спектрами, полученными по результатам климатических моделей проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5), показало их сильный разброс (Bellenger et al., 2014; Privalsky and Yushkov, 2015; Rao and Ren, 2014; Ren et al., 2015; Stevenson, 2012). Воспроизводимые моделями CMIP5 глобальные и региональные структуры аномалий гидрометеорологических полей при Эль-Ниньо также продемонстрировали широкое разнообразие наблюдаемых аномалий (Hurwitz et al., 2014; Jha et al., 2014; Oh et al., 2014; Weare, 2013).

Данная работа посвящена сравнению глобальных структур различий в ДУМ и температуры воздуха у поверхности (ТВП), возникающих при Эль-Ниньо и при Ла-Нинья, т.е. на положительных и отрицательных фазах ГАО, а также временных энергетических спектров индексов ЭНЮК и ГАО, рассчитанных по данным наблюдений и их ре-анализам, с соответствующими характеристиками, полученными при интегрировании моделей CMIP5, с целью выявления недостатков современных климатических моделей.

Материалы и методы исследования

Для анализа были выбраны глобальные среднемесячные поля ДУМ из следующих источников: NCEP/NCAR Reanalysis на сетке $2.5 \times 2.5^\circ$ за период 1948–2016 (Kalnay et al., 1996), Met Office Hadley Center HadSLP2 на сетке $5 \times 5^\circ$ за период 1850–2016 (Allan and Ansell, 2006), NOAA CIRES 20th Century Global Reanalysis Version 2c (20thC_ReanV2c) на сетке $2 \times 2^\circ$ за период 1851–2014 (Compo et al., 2011), ECMWF ERA-20C на сетке $1 \times 1^\circ$ за период 1900–2010 (Stickler et al., 2014) и JMA JRA-55 на сетке $1.25 \times 1.25^\circ$ за период 1958–2013 (Kobayashi et al., 2015).

Глобальные среднемесячные значения температуры поверхности океана (ТПО) были взяты из массивов: Met Office Hadley Center HadISST на сетке $1 \times 1^\circ$ за период 1870–2016 (Rayner et al., 2003), JMA COBE SST2 на сетке $1 \times 1^\circ$ за период 1850–2016 (Hirahara et al., 2014) и NOAA ERSST V4 на сетке $2 \times 2^\circ$ за период 1854–2015 (Huang et al., 2015; Liu et al., 2015). Дополнительно анализировались глобальные среднемесячные данные приповерхностной температуры Met Office Hadley Center HadCRUT.4.5 на сетке $5 \times 5^\circ$ за период 1850–2016 (Jones et al., 2012), и глобальные среднемесячные данные ТВП из уже упомянутых выше ре-анализов: NCEP/NCAR, 20thC_ReanV2c, ERA-20C и JRA-55.

Для каждого из перечисленных массивов данных, за весь доступный в нем временной период, в каждом узле сетки рассчитывался средний годовой ход, который затем вычитался из исходных данных. По полученным таким образом полям аномалий рассчитывались три индекса. Во-первых, индекс Эль-Ниньо, названный Расширенным океаническим индексом (Extended Oceanic Nino Index – EONI). Он представляет собой среднюю аномалию ТПО в области (5° ю.ш.– 5° с.ш., 170 – 80° з.д.). В этой области обычно имеется больше данных корабельных наблюдений ТПО, чем в области рассматриваемой при оценке стандартного для определения Эль-Ниньо индекса Nino 3.4 (5° ю.ш.– 5° с.ш., 170 – 120° з.д.). Во-вторых,

Экваториальный индекс Южного колебания (Equatorial Southern Oscillation Index – ESOI), он определяется по разности средних аномалий ДУМ между областями (5° ю.ш.– 5° с.ш., 90 – 140° в.д.) и (5° ю.ш.– 5° с.ш., 130 – 80° з.д.). В-третьих, индекс ГАО (Global Atmospheric Oscillation Index – GAOI), который представляет собой следующую комбинацию нормированных средних аномалий ДУМ в симметрично расположенных 10 очагах глобального поля ГАО, в которых значения этого поля имеют наибольшую статистическую значимость: (5° ю.ш.– 5° с.ш., 35 – 25° з.д.) + (5° ю.ш.– 5° с.ш., 55 – 65° в.д.) + (55 – 65° с.ш., 95 – 85° з.д.) + (65 – 55° ю.ш., 95 – 85° з.д.) + (5° ю.ш.– 5° с.ш., 145 – 155° в.д.) – (45 – 55° с.ш., 175 – 165° з.д.) – (45 – 55° с.ш., 15 – 5° з.д.) – (55 – 45° ю.ш., 15 – 5° з.д.) – (55 – 45° ю.ш., 175 – 165° з.д.) – (5° ю.ш.– 5° с.ш., 95 – 85° з.д.). В отличие от других индексов ЭНЮК и ГАО, GAOI содержит аномалии средних и высокоширотных областей, где вероятность аномалий ГАО велика, поэтому GAOI характеризует всю планетарную структуру ГАО, а не только ее тропическую часть, как предложенный в работе (Бышев и др., 2014) индекс. GAOI изменяется синхронно с EONI и ESOI, поскольку его вариации включают Южное колебание. Это показывает, что все атмосферные процессы, приводящие к ГАО, развиваются более или менее синхронно. Линейные тренды были удалены из полученных рядов всех индексов методом наименьших квадратов, с целью подавления междекадных изменений климата.

События Эль-Ниньо и Ла-Нинья определялись по EONI так, чтобы значение этого индекса превышало на протяжении 5 месяцев подряд или дольше величину $+0.5^{\circ}\text{C}$ при Эль-Ниньо и было меньше -0.5°C при Ла-Нинья. Для каждого выбранного таким образом события были рассчитаны глобальные поля средних аномалий ДУМ и ТВП. Эти поля усреднялись отдельно по событиям Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Затем вычислялась разность полученных средних полей. Кроме того, определялось поле среднеквадратических отклонений отдельных событий от среднего поля по каждому типу событий (Эль-Ниньо и Ла-Нинья) и на этой основе оценивались поля статистической значимости различий между средними полями согласно критерию t Стьюдента с различной степенью вероятности. Положительные и отрицательные фазы ГАО определялись по GAOI аналогично событиям Эль-Ниньо и Ла-Нинья, но критерием выбора при этом служило среднеквадратичное отклонение и время, за которое автокорреляционная функция GAOI достигает нулевого значения. Для фаз ГАО также построены глобальные поля средних разностей ТВП и ДУМ и оценена статистическая значимость этих аномалий, которые оказались очень близки к полям, полученным по EONI.

Временные энергетические спектры индексов рассчитывались методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Чтобы обеспечить максимальное разрешение этих спектров по периодам, рассчитывалась целая группа спектров по методу Уэлча (Welch, 1967). Для этого из исходных рядов выбирались части, соответствующие «окнам», чья ширина варьировалась от полной длины исходного ряда до его половины и при этом «окно» скользило по всей длине исходного ряда. Все полученные спектры усреднялись, и осредненный спектр сглаживался скользящим средним (Серых и Сонечкин, 2017а, 2017б).

Все рассчитанные по данным измерений и ре-анализов глобальные поля средней амплитуды колебаний ДУМ и ТВП при ГАО и энергетические спектры индексов сравнивались с соответствующими полями и спектрами полученными аналогичным способом по результатам эксперимента Historical за период 1850–2005 для 47 совместных моделей общей циркуляции океана и атмосферы, доступных к настоящему времени в рамках проекта CMIP5: ACCESS1.0, ACCESS1-3, bcc-csm1-1, bcc-csm1-1-m, BNU-ESM, CanESM2, CCSM4, CESM1-BGC, CESM1-CAM5, CESM1-FASTCHEM, CESM1-WACCM, CMCC-CESM, CMCC-CM, CMCC-CMS, CNRM-CM5, CNRM-CM5-2, CSIRO-Mk3.6, EC-EARTH, FGOALS-s2, FIO-ESM, GFDL-CM2p1, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, GISS-E2-H, GISS-E2-H-CC, GISS-E2-R, GISS-E2-R-CC, HadCM3, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, INM-CM4, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5B-LR, MIROC4h, MIROC5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-P, MRI-CGCM3, MRI-ESM1, NorESM1-M, NorESM1-ME (Taylor et al., 2012). Проведено визуальное сравнение полученных полей. Кроме того, были рассчитаны различия между полями после их линейной интерполяции на сетку $1 \times 1^\circ$. Из 47 исследованных моделей CMIP5 были выбраны те, которые наиболее близко воспроизводят глобальную структуру ГАО и энергетические спектры исследуемых индексов. Для этих климатических моделей описанным выше способом рассчитаны поля и спектры по результатам эксперимента piControl, в котором в отличие от эксперимента Historical отсутствует внешний форсинг изменений солнечной активности. Результаты экспериментов Historical и piControl сравнивались между собой с целью оценки влияния внешних сил на периодичность ГАО и ЭНЮК.

Обсуждение результатов

Сравнение глобальных полей разностей ДУМ и ТВП между противоположными фазами ГАО, построенных по данным наблюдений и ре-анализам, показало их близкое сходство. Исходя из этого, в данной работе эти поля иллюстрируются только на примере ре-анализа 20thC_ReanV2c (рис. 1а и 2а). Поле ДУМ ГАО (рис. 1а) представляет собой планетарную структуру, обладающую, с учетом расположения и рельефа континентов, некоторой симметрией относительно экватора и меридиана 90° з.д. Обширная область положительных значений ДУМ ГАО в тропиках и субтропиках Атлантического, Индийского и западной части Тихого океанов окружена лентами отрицательных значений, пересекающимися на востоке Тихого океана ($120\text{--}90^\circ$ з.д.) вблизи экватора. В высоких широтах, к северу и югу от этого пересечения, почти симметрично расположены две области положительных аномалий ДУМ.

Описанная выше структура колебаний ДУМ, вызванных ГАО, хорошо соответствует сопровождающим её изменениям ТВП (рис. 2а). В них прослеживается глобальная структура температурных колебаний, симметричная (с поправкой на континенты) относительно экватора и относительно меридиана, проходящего через

120° з.д. Обширная область положительных значений ТВП в тропиках и субтропиках Атлантического и Индийского океанов окаймлена полосами отрицательных значений. Но на месте их пересечения в центрально-восточной части тропиков Тихого океана расположен характерный для Эль-Ниньо «язык» положительных аномалий ТВП. К северу и югу от него в высоких широтах почти симметрично расположены две области положительных значений аномалий ТВП.

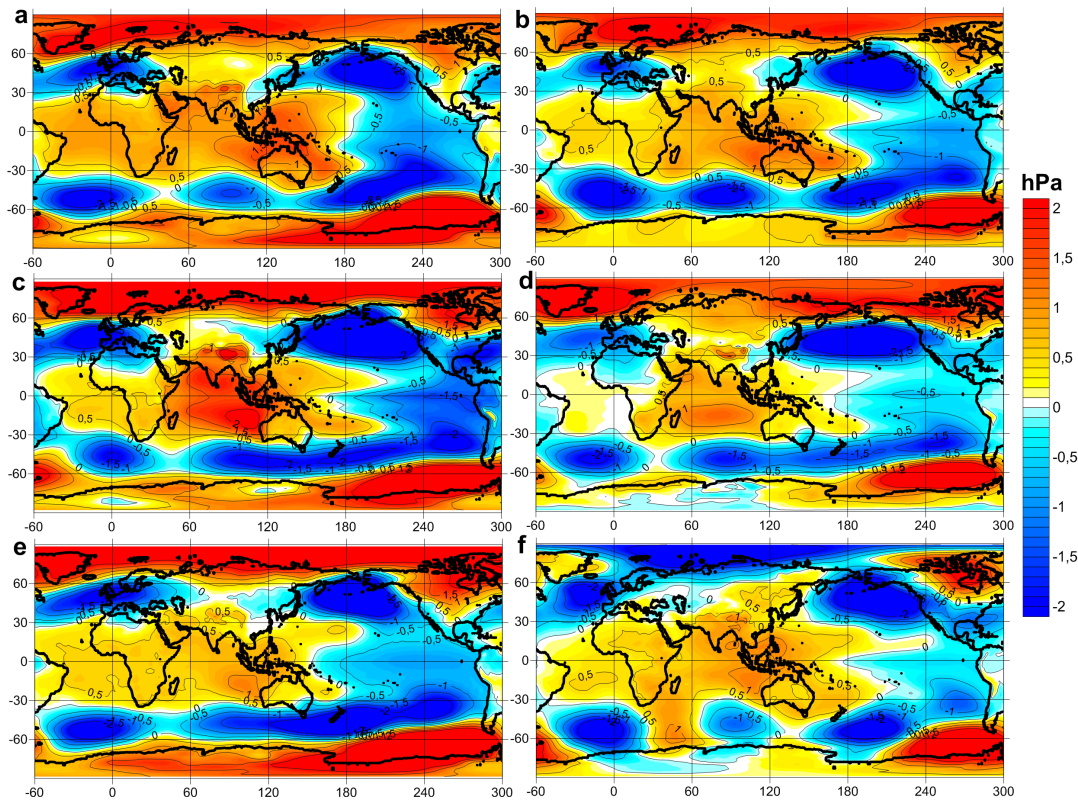


Рис. 1. Поля средних разностей давления на уровне моря (ДУМ) между положительной и отрицательной фазами Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО) для ре-анализа 20thC_ReanV2c (a) и эксперимента Historical климатических моделей CMIP5: ACCESS1-3 (b), CanESM2 (c), INM-CM4 (d), MPI-ESM-MR (e) и MRI-CGCM3 (f).

Поля разности ДУМ и ТВП между противоположными фазами ГАО, рассчитанные по результатам эксперимента Historical проекта CMIP5, которые наиболее близко соответствуют данным наблюдений и их ре-анализам, представлены на рис. 1b-1f и 2b-2f. На полученных по моделям полях ДУМ обращают на себя внимание заниженные по сравнению с данными наблюдений значения разностей в тропиках Атлантического океана и Африки (рис. 1). Это свидетельствует о более слабых в моделях дальних связях Тихоокеанской и Индоокеанской ячеек циркуляции Уокера с Атлантической и Африканской. В результатах моделирования полосы отрицательных значений ДУМ, окаймляющие обширную тропическую область положительных значений, выражены слабее и имеют больше разрывов, чем аналогичные полосы в данных наблюдений. Это говорит о недоучтенных в моделях взаимосвязях между тропиками и средними широтами, осуществляемых циркуляцией Гадлея.

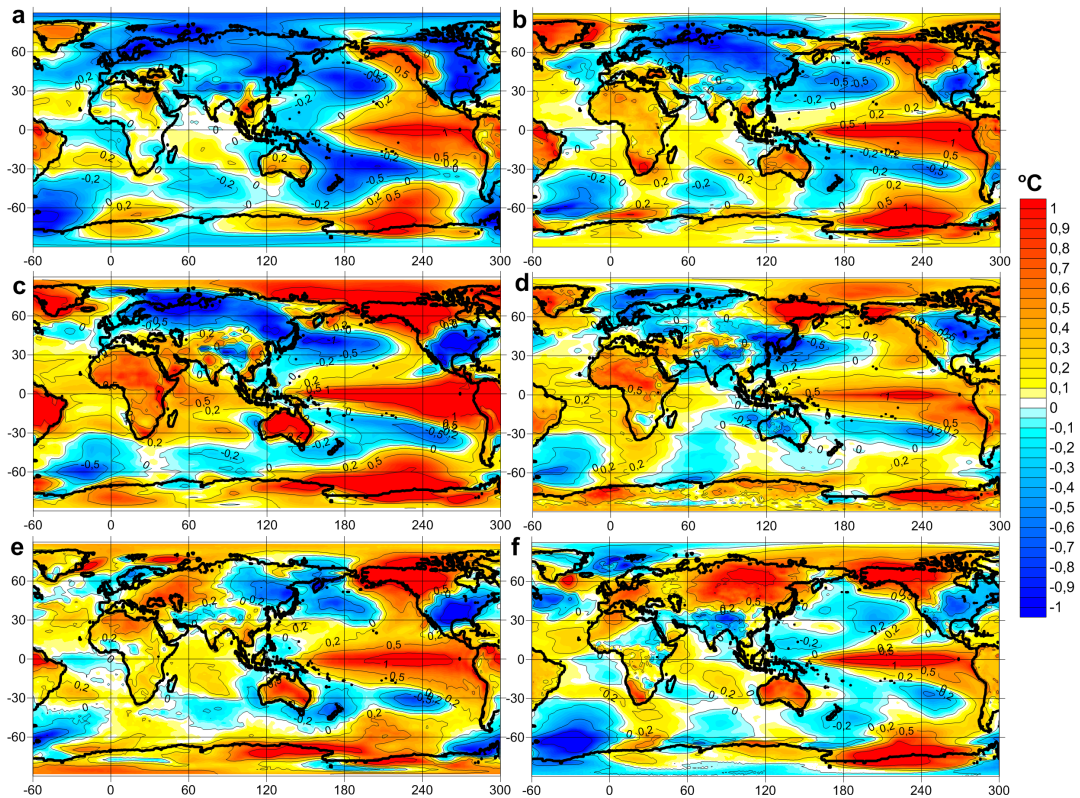


Рис. 2. Поля средних разностей температуры воздуха у поверхности (ТВП) между положительной и отрицательной фазами Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО) для ре-анализа 20thC_ReanV2c (a) и эксперимента Historical климатических моделей CMIP5: ACCESS1-3 (b), CanESM2 (c), INM-CM4 (d), MPI-ESM-MR (e) и MRI-CGCM3 (f).

В сравнении с данными наблюдений, пространственные структуры ДУМ, полученные по моделям, ближе повторяют контуры соответствующих структур ТВП. В модельных пространственных структурах ДУМ прослеживается характерный для Эль-Ниньо «язык» положительных аномалий ТПО в тропиках Тихого океана, что свидетельствует о переоцененном в моделях влиянии изменений ТПО на ДУМ. У моделей (рис. 2) этот «язык» ТПО распространяется слишком далеко на запад Тихого океана, захватывая регион Индонезии, что является следствием завышения в этих моделях экваториального апвеллинга в центре и на западе Тихого океана (Володин и Дианский, 2004). Обращает на себя внимание тот факт, что поля ТВП, рассчитанные по моделям, имеют менее гладкую структуру над континентами, чем аналогичные поля в ре-анализах. Это говорит о несколько завышенном влиянии рельефа в этих моделях.

То, как модели воспроизводят временную динамику ГАО, лучше всего рассматривать путем сравнения реально наблюдаемых и моделированных временных энергетических спектров GAOI (рис. 3). На рис. 3а видно, что такой реальный спектр на периодах от 1 года до 2 лет близок к практически «белому», от 2 до 3 лет является «красным», а от 3 до 20 лет снова становится практически «белым», т.е. его спектральная плотность одинакова, если ее рассматривать

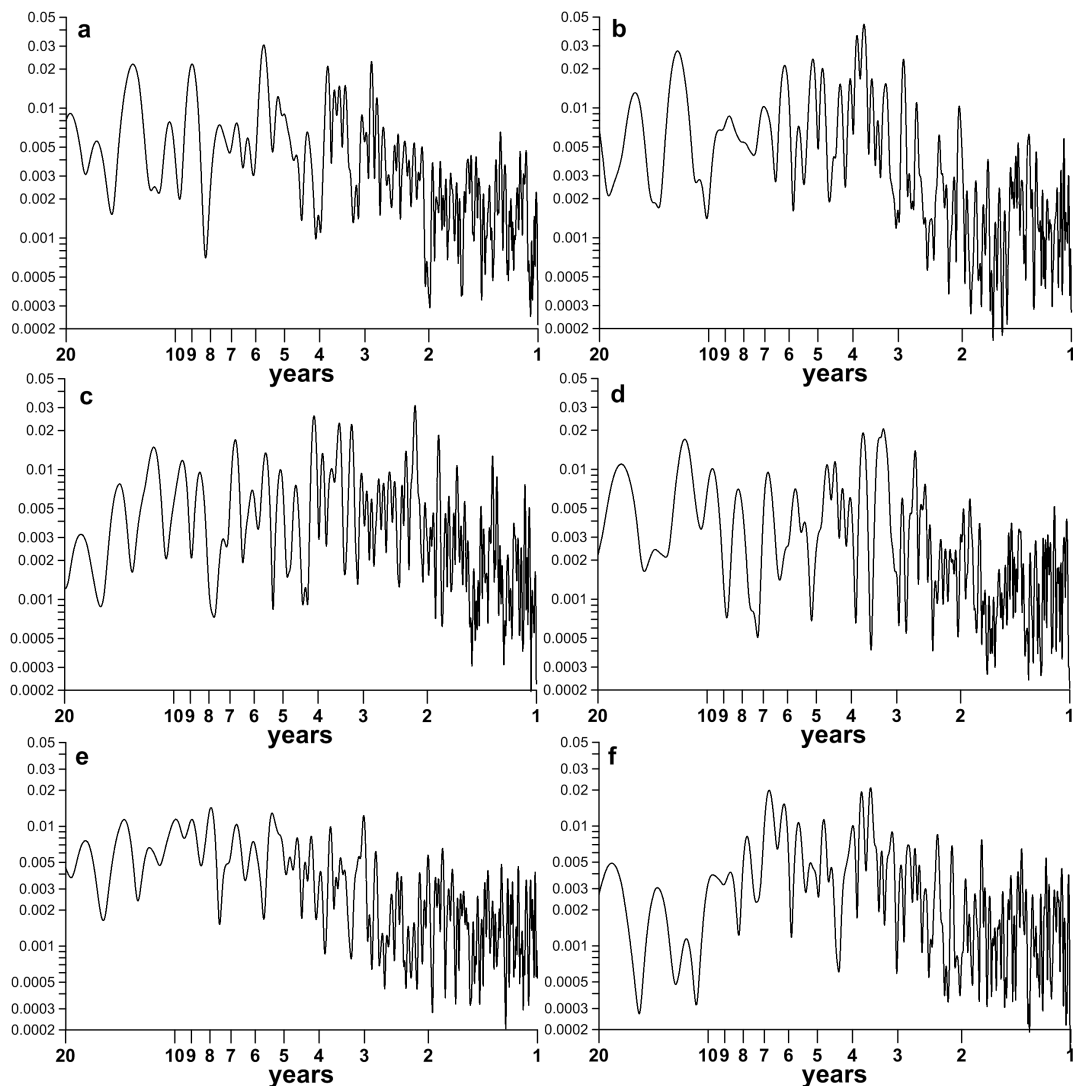


Рис. 3. Энергетические спектры индекса Глобальной атмосферной осцилляции (GAOI) для ре-анализа 20thC_ReanV2c (a) и эксперимента Historical моделей CMIP5: ACCESS1-3 (b), CanESM2 (c), INM-CM4 (d), MPI-ESM-MR (e) и MRI-CGCM3 (f).

в окне, шириной порядка года и более. Среди показанных модельных спектров этим свойством обладает только спектры моделей ACCESS1-3 (рис. 3b) и INM-CM4 (рис. 3d). У модели CanESM2 (рис. 3c) спектральная плотность возрастает на периодах от 1 года до 2 лет, а на периодах более 2 лет убывает с ростом периода. У модели MPI-ESM-MR (рис. 3e) спектр «красный», т.е. спектральная плотность, в общем, увеличивается по мере роста периода вплоть до примерно 7 лет, и далее не растет, а даже начинает немного уменьшаться. Спектр модели MRI-CGCM3 (рис. 3f) является «красным» от 1 года до 3.5 лет, затем «белым» до 7 лет, а затем спектральная плотность резко убывает с ростом периода.

Значительные различия между реальными и модельными спектрами существуют также в положении и мощности пиков спектральной плотности. Отметим, что уже давно большинство исследователей заключили, что основные пики в спектрах

ЭНЮК являются статистически значимыми (Trenberth, 1976; Torrence and Compo, 1997). Это заключение тем более весомо, что теоретические работы (Jin et al., 1994, 1996; Tziperman et al., 1994) по учету периодически меняющегося притока тепла к климатической системе от Солнца показали неизбежное появление пиков в спектрах ЭНЮК на комбинационных гармониках годового периода. В реальном спектре (рис. 3а) главные пики находятся на периодах 5.6, 3.7 и 2.8 года. Они не являются комбинационными гармониками годового периода. Но их можно уподобить супергармоникам 1:2, 1:3 и 1:4 11-летнего цикла солнечной активности. Коль скоро это принимается, это означает, что климатическая система реагирует на воздействие солнечной активности, хотя это воздействие энергетически крайне мало. Реакция системы на это малое воздействие является нелинейной. Поэтому она видна не на самом 11-летнем периоде, а на его супергармониках. Такое предположение уже высказывалось (Вакуленко и Сонечкин, 2011).

Спектры моделей CMIP5, показанные на рис. 3b-f, были рассчитаны по результатам эксперимента Historical, в котором присутствует форсинг 11-летнего цикла изменений солнечной активности. Поэтому эти спектры также демонстрируют некоторые пики на периодах, близких к вышеуказанным супергармоникам. Однако в спектрах, рассчитанных по результатам эксперимента piControl (без внешнего форсинга), эти пики теряются на фоне других, более мощных пиков. Отметим также, что группы мощных пиков в реальном спектре вблизи периодов 2.4, 3.6 и 4.8 года можно уподобить субгармоникам 1:2, 1:3 и 1:4 чандлеровского колебания полюсов Земли с периодом около 1.2 года (Sidorenkov, 2009; Серых и Сонечкин, 2017а, 2017б). В работе (Серых и Сонечкин, 2016) было показано, как это колебание может возбуждать теплое поверхностное течение у тихоокеанского берега Центральной Америки, т.е. положительные аномалии ТПО характерные для Эль-Ниньо. В моделях CMIP5 чандлеровское колебание полюсов вообще не учитывается. Поэтому эти пики отсутствуют в большинстве модельных спектров.

Выводы

1. Путем сравнения данных ре-анализов и результатов интегрирований современных климатических моделей показано, что некоторые из моделей совместной циркуляции океана и атмосферы, участвующие в международном проекте CMIP5, в общем, воспроизводят планетарные структуры аномалий в полях давления на уровне моря (ДУМ) и температуры воздуха у поверхности (ТВП), наблюдающиеся при событиях Эль-Ниньо и Ла-Нинья, которые были недавно обнаружены в реальной атмосфере и названы Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО). Конечно, существуют многие количественные различия между элементами реальной и моделированных пространственных структур ГАО.

2. Для характеристики временной динамики ГАО был разработан индекс, который представляет собой комбинацию средних аномалий ДУМ в 10 очагах глобального поля ГАО. По данным наблюдений и результатам интегрирований

моделей CMIP5 были выполнены оценки временных энергетических спектров индексов ГАО и ЭНЮК в диапазоне масштабов от 1 года до 20 лет. Эти расчеты показали двоякие различия в характере реальных и моделированных спектров.

3. Реальные спектры, рассматриваемые в целом, выглядят как «белый шум» от 1 года до 2 лет, «красный шум» от 2 до 3 лет, и снова как «белый шум» от 3 до 20 лет. В то время как моделированные спектры показывают большой разброс своих форм в этом отношении. Из числа пяти иллюстрированных модельных спектров, относящихся к моделям, лучше всего воспроизводящим пространственную структуру ГАО, только модели ACCESS1-3 и INM-CM4 показывают спектр наиболее близкий по форме к реальному спектру. Общий характер спектров моделей MPI-ESM-MR и MRI-CGCM3 соответствует «красному шуму». Спектр модели CanESM2 показывает общее убывание спектральной плотности с ростом периода, что является совсем противоестественным.

4. Все спектры, включая реальные и моделированные, обнаруживают большое число статистически значимых пиков спектральной плотности. Но их расположение на оси периодов у всех модельных спектров существенно отличается от такового у реальных спектров. Три главных пика в реальных спектрах наблюдаются на периодах 5.6, 3.7 и 2.8 года, т.е. на супергармониках 11-летнего цикла солнечной активности. Из числа иллюстрированных модельных спектров только у некоторых моделей можно усмотреть пики на близких к указанным периодам при условии, что эти спектры подсчитаны по результатам эксперимента Historical, в котором изменения солнечной активности принимались во внимание. Если же спектры подсчитывались по результатам этих моделей в эксперименте piControl (без форсинга от 11-летнего цикла солнечной активности), пики на вышеуказанных супергармониках ни разу не появлялись. Это косвенно доказывает, что главные пики в реальных спектрах действительно можно считать нелинейными откликами реальной климатической системы на 11-летний цикл солнечной активности. В реальных спектрах имеется также последовательность пиков на периодах 2.4, 3.6 и 4.8 года, которые можно истолковать как субгармоники чандлеровского колебания полюсов Земли, чей период приблизительно составляет 1.2 года. Ни один из экспериментов CMIP5 не принимал во внимание чандлеровское колебание. Поэтому не удивительно, что модельные спектры не воспроизводят подобные пики.

5. Учитывая найденные различия в том, как современные климатические модели воспроизводят пространственную структуру ГАО и, особенно, как они воспроизводят временные спектры индексов ГАО и ЭНЮК, становится понятно, почему в настоящее время не удается предсказывать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью более сезона – полугодия. Представляется, что для преодоления этого так называемого «весеннего предела предсказуемости» необходимо более адекватно учитывать периодические внешние воздействия на климатическую систему, такие как изменения солнечной активности и чандлеровское колебание полюсов Земли.

Статья подготовлена при поддержке программы президиума РАН № 1.2.49 «Взаимодействие физических, химических и биологических процессов в Мировом океане».

Литература

- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. Эль-Ниньо как следствие Глобальной атмосферной осцилляции в динамике климатической системы Земли // Доклады Академии наук. 2012а. Т. 446. № 1. С. 89–94.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О влиянии событий Эль-Ниньо на климатические характеристики Индоокеанского региона // Океанология. 2012б. Т. 52. № 2. С. 165–175.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. Глобальные атмосферные осцилляции в динамике современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 62–71.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В., Сонечкин Д.М. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 179–185.
- Вакуленко Н.В., Сонечкин Д.М. Свидетельство влияния солнечной активности на Эль-Ниньо Южное колебание // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 1–6.
- Володин Е.М., Дианский Н.А. Воспроизведение Эль-Ниньо в совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Метеорологии и Гидрологии. 2004. № 12. С. 5–14.
- Серых И.В., Сонечкин Д.М. О влиянии полюсного прилива на Эль-Ниньо // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 44–52.
- Серых И.В., Сонечкин Д.М. О проявлениях движений полюсов Земли в ритмах Эль-Ниньо Южного колебания // Доклады Академии наук. 2017а. Т. 472. № 6. С. 716–719.
- Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 2: Междугодовые ритмы Эль-Ниньо Южного колебания // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2017б. Т. 25. № 5. С. 5–25.
- Allan R.J., Ansell T.J. A new globally-complete monthly historical gridded mean sea level pressure data set (HadSLP2): 1850–2004 // *J. Climate*. 2006. Vol. 19. P. 5816–5846.
- Bellenger H., Guilyardi E., Leloup J., Lengaigne M., Vialard J. ENSO representation in climate models: from CMIP3 to CMIP5 // *Clim. Dyn.* 2014. Vol. 42. P. 1999–2018.
- Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. The Twentieth Century Reanalysis Project // *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 1–28.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. The NCEP / NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. Vol. 77. P. 437–471.
- Jin F.F., Neelin J.D., Ghil M. El Nino on the devil's: annual subharmonic steps to chaos // *Science*. 1994. Vol. 264. P. 70–72.
- Jin F.F., Neelin J.D., Ghil M. El Nino/Southern Oscillation and the annual cycle: Subharmonic frequency locking and aperiodicity // *Physica D*. 1996. Vol. 98. P. 442–465.
- Jha B., Hu Z., Kumar A. SST and ENSO variability and change simulated in historical experiments of CMIP5 models // *Clim. Dyn.* 2014. Vol. 42. P. 2113–2124.
- Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010 // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. D05127.

- Hirahara S., Ishii M., Fukuda Y. Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty // *J. of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 57–75.
- Huang B., Banzon V.F., Freeman E. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and intercomparisons // *J. Clim.* 2015. Vol. 28. No. 3. P. 911–930.
- Hurwitz M.M., Calvo N., Garfinkel C.I. Extra-tropical atmospheric response to ENSO in the CMIP5 models // *Clim. Dyn.* 2014. doi 10.1007/s00382-014-2110-z.
- Kobayashi S., Ota Y., Harada Y. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // *J. Met. Soc. Jap.* 2015. Vol. 93. No. 1. P. 5–48.
- Liu W., Huang B., Thorne P.W. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST. v4): Part II. Parametric and structural uncertainty estimations // *J. Clim.* 2015. Vol. 28. No. 3. P. 931–951.
- McPhaden M.J., Zebiak S.E., Glantz M.H. ENSO as an integrating concept in Earth science // *Science*. 2006. Vol. 314. P. 1740–1745.
- Oh J.H., Shin D.W., Cocke S.D., Baigorria G.A. ENSO Teleconnection Pattern Changes over the Southeastern United States under a Climate Change Scenario in CMIP5 Models // *Advances in Meteorology*. 2014. Vol. 2014. Article D1648197.
- Peng J.B., Chen L.T., Zhang Q.Y. The relationship between the El Nino/La Nina cycle and the transition chains of four atmospheric oscillations. Part I: The four oscillations // *Adv. Atmos. Sci.* 2014. Vol. 31. No. 2. P. 468–479.
- Peterson R.G., White W.B. Slow teleconnections linking the Antarctic Circumpolar Wave with the tropical El Nino Southern Oscillation // *J. geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 24573–24583.
- Privalsky V., Yushkov V. ENSO influence upon global temperature in nature and in CMIP5 simulations // *Atmos. Sci. Lett.* 2015. Vol. 16. P. 240–245.
- Rao J., Ren R.C. Statistical characteristics of ENSO events in CMIP5 models // *Atmos. Oceanic Sci. Lett.* 2014. Vol. 7. P. 546–552.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. Article D144407.
- Ren H.L., Zuo J., Jin F.F., Stuecker M.F. ENSO and annual cycle interaction: the combination mode representation in CMIP5 models // *Clim. Dyn.* 2015. doi 10.1007/s00382-015- 2802-z.
- Romanov Y.A., Romanova N.A., Romanov P.Y. Distribution of icebergs in the Atlantic and Indian 13 ocean Sectors of the Antarctic region and its possible links with ENSO // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. Article D1LO2506.
- Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. Wiley-VCH & Co. KCA: Weinheim, 2009. 305 p.
- Stevenson S.L. Significant changes to ENSO strength and impacts in the twenty-first century: Results from CMIP5 // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. Article D1L17703.
- Stickler A., Brönnimann S., Valente M.A. ERA-CLIM: Historical Surface and Upper-Air Data for Future Reanalyses // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vol. 95. No. 9. P. 1419–1430.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. Overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2012. Vol. 93. P. 485–498.
- Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1997. Vol. 79. No. 1. P. 61–78.
- Trenberth K.E. Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1976. Vol. 102. P. 639–653.
- Tziperman E., Stone L., Cane M.A. El Nino chaos: Overlapping of resonances between the seasonal

- cycle and the Pacific ocean atmosphere oscillator // *Science*. 1994. Vol. 264. P. 72–74.
- Voskresenskaya E.N., Polonsky A.B. Air pressure fluctuations in the North Atlantic and their relationship with El Nino southern oscillations // *Physical oceanography*. 1993. Vol. 4. P. 275–282.
- Weare B.C. El Nino teleconnections in CMIP5 models // *Clim. Dyn.* 2013. Vol. 41. P. 2165–2177.
- Welch P.D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967. Vol. AU-15. No. 2. P. 70–73.

ON THE DYNAMICS AND STRUCTURE OF THE GLOBAL ATMOSPHERIC OSCILLATION IN CLIMATE MODELS AND REALITY

I.V. Serykh

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: iserykh@ocean.ru
Submitted 28.02.2018, accepted 26.04.2018*

Global fields of mean anomalies of the sea-level atmospheric pressure and the surface air temperature are constructed for positive and negative phases of a recently discovered by Russian scientists Global atmospheric oscillation (GAO) with El Niño and La Niña as its elements. This is done using observations and their re-analyses, as well as the results of experiments with climate models. A GAO index is proposed, and its spectra, as well as spectra of El Niño – Southern Oscillation, are calculated. It is shown that some of the modern models of ocean-atmosphere general circulation of the international Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) reproduce well the GAO spatial structure. The model temporal energy spectra, however, differ from the real ones in the general variation of the energy spectra of interannual – decadal oscillations, as well as in the periods of specific peaks in this range. A comparison of CMIP5 experiments called Historical and piControl shows that the climate models with the 11-year solar activity cycle forcing reproduce the GAO periodicity more accurately. It is concluded that the differences between the model spectra and the real ones cause major errors in the predictions of the El Niño onset for more than half a year.

Keywords: Global atmospheric oscillation, El Niño, La Niña, observational data, re-analyses, coupled models of the ocean-atmosphere general circulation, energy spectra, 11-year cycle of solar activity, Chandler oscillation

References

- Allan R.J. and Ansell T.J. A new globally-complete monthly historical gridded mean sea level pressure data set (HadSLP2): 1850–2004. *J. Climate*, 2006, Vol. 19, pp. 5816–5846.
- Bellenger H., Guilyardi E., Leloup J., Lengaigne M., and Vialard J. ENSO representation in climate models: from CMIP3 to CMIP5. *Clim. Dyn.*, 2014, Vol. 42, pp. 1999–2018.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V. El Niño as a consequence of the global oscillation in the dynamics of the Earth's climatic system. *Doklady Earth Sciences*, 2012a, Vol. 446, No. 1, pp. 1089–1094.

- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Y.A., and Serykh I.V. On El Niño's impact upon the climate characteristics of the Indian monsoon. *Oceanology*, 2012b, Vol. 52, No. 2, pp. 147–156.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Y.A., and Serykh I.V. Global atmospheric oscillations in dynamic of the recent climate. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 62–71.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V., and Sonechkin D.M. Statistical significance and climatic role of the Global Atmospheric Oscillation. *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 165–171.
- Compo G.P., Whitaker J.S., and Sardeshmukh P.D. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2011, Vol. 137, pp. 1–28.
- Jha B., Hu Z., and Kumar A. SST and ENSO variability and change simulated in historical experiments of CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, 2014, Vol. 42, pp. 2113–2124.
- Jones P.D., Lister D.H., and Osborn T.J. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *J. Geophys. Res.*, 2012, Vol. 117, D05127.
- Hirahara S., Ishii M., and Fukuda Y. Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. of Climate*, 2014, Vol. 27, pp. 57–75.
- Huang B., Banzon V.F., and Freeman E. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST.v4), Part I: Upgrades and intercomparisons. *J. Clim.*, 2015, Vol. 28, No. 3, pp. 911–930.
- Hurwitz M.M., Calvo N., and Garfinkel C.I. Extra-tropical atmospheric response to ENSO in the CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, 2014, DOI 10.1007/s00382-014-2110-z.
- Jin F.F., Neelin J.D., and Ghil M. El Nino on the devil's: annual subharmonic steps to chaos. *Science*, 1994, Vol. 264, pp. 70–72.
- Jin F.F., Neelin J.D., and Ghil M. El Nino/Southern Oscillation and the annual cycle: Subharmonic frequency locking and aperiodicity. *Physica D*, 1996, Vol. 98, pp. 442–465.
- Kalnay E., Kanamitsu M., and Kistler R. The NCEP / NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, Vol. 77, pp. 437–471.
- Kobayashi S., Ota Y., and Harada Y. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Met. Soc. Jap.*, 2015, Vol. 93, No. 1, pp. 5–48.
- Liu W., Huang B., and Thorne P.W. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST. v4): Part II. Parametric and structural uncertainty estimations. *J. Clim.*, 2015, Vol. 28, No. 3, pp. 931–951.15
- McPhaden M.J., Zebiak S.E., and Glantz M.H. ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, 2006, Vol. 314, pp. 1740–1745.
- Oh J.H., Shin D.W., Cocke S.D., and Baigorria G.A. ENSO Teleconnection Pattern Changes over the Southeastern United States under a Climate Change Scenario in CMIP5 Models. *Advances in Meteorology*, 2014, Vol. 2014, Article D1648197.
- Peng J.B., Chen L.T., and Zhang Q.Y. The relationship between the El Nino/La Nina cycle and the transition chains of four atmospheric oscillations. Part I: The four oscillations. *Adv. Atmos. Sci.*, 2014, Vol. 31, No. 2, pp. 468–479.
- Peterson R.G. and White W.B. Slow teleconnections linking the Antarctic Circumpolar Wave with the tropical El Nino – Southern Oscillation. *J. geophys. Res.*, 1998, Vol. 103, pp. 24573–24583.
- Privalsky V. and Yushkov V. ENSO influence upon global temperature in nature and in CMIP5 simulations. *Atmos. Sci. Lett.*, 2015, Vol. 16, pp. 240–245.
- Rao J., Ren R.C., Statistical characteristics of ENSO events in CMIP5 models, *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 2014, Vol. 7, pp. 546–552.

- Rayner N.A., Parker D.E., and Horton E.B. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 2003, Vol. 108, Article ID 4407.
- Ren H.L., Zuo J., Jin F.F., and Stuecker M.F. ENSO and annual cycle interaction: the combination mode representation in CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, 2015, DOI 10.1007/s00382-015-2802-z.
- Romanov Y.A., Romanova N.A., and Romanov P.Y. Distribution of icebergs in the Atlantic and Indian ocean Sectors of the Antarctic region and its possible links with ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, Vol. 35, Article D1LO2506.
- Serykh I.V. and Sonechkin D.M. Confirmation of the oceanic pole tide influence on El Niño. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 44–52.
- Serykh I.V. and Sonechkin D.M., Manifestations of motions of the Earth's pole in the El Niño – Southern Oscillation rhythms. *Doklady Earth Sciences*, 2017a, Vol. 472, No 2, pp. 256–259.
- Serykh I.V. and Sonechkin D.M., Chaos and order in atmospheric dynamics. Part 2. Interannual rhythms of the El Niño – Southern oscillation. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2017b, Vol. 25, No. 5, pp. 5–25.
- Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. *Wiley-VCH & Co. KCA, Weinheim*, 2009, 305 p.
- Stevenson S.L. Significant changes to ENSO strength and impacts in the twenty-first century: Results from CMIP5. *Geophys. Res. Lett.*, 2012, Vol. 39, Article D1L17703.
- Stickler A., Brönnimann S., and Valente M.A. ERA-CLIM: Historical Surface and Upper-Air Data for Future Reanalyses. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2014, Vol. 95, No. 9, pp. 1419–1430.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., and Meehl G.A. Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 2012, Vol. 93, pp. 485–498.
- Torrence C. and Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1997, Vol. 79, No. 1, pp. 61–78.
- Trenberth K.E. Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1976, Vol. 102, pp. 639–653.
- Tziperman E., Stone L., and Cane M.A. El Niño chaos: overlapping of resonances between the seasonal cycle and the Pacific ocean – atmosphere oscillator. *Science*, 1994, Vol. 264, pp. 72–74.
- Vakulenko N.V. and Sonechkin D.M. Evidence of the solar Activity's effect on El Niño Southern Oscillation. *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 6, pp. 935–939.
- Volodin E.M. and Diansky N.A. El Niño in a coupled ocean-atmosphere general circulation model, 16. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2004, Vol. 12, pp. 5–14.
- Voskresenskaya E.N. and Polonsky A.B. Air pressure fluctuations in the North Atlantic and their relationship with El Niño - southern oscillations. *Physical oceanography*, 1993, Vol. 4, pp. 275–282.
- Weare B.C. El Niño teleconnections in CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, 2013, Vol. 41, pp. 2165–2177.
- Welch P.D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1967, Vol. AU-15, No. 2, pp. 70–73.