

ОСОБЕННОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ ПОЛУШАРНЫХ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В МАСШТАБАХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДАННЫМ РАСЧЕТОВ С КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ИВМ РАН

Н.В. Вакуленко¹⁾, Е.М. Володин²⁾, Д.М. Сонечкин^{1,3)}*

¹⁾ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36

²⁾ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 8

³⁾ Гидрометцентр России,
Россия, 123242, г. Москва, Бол. Предтеченский пер., 11-13; **vanava139@yandex.ru*

Реферат. С помощью техники вейвлетных кросскорреляций рассматриваются особенности полушарных вариаций приземной температуры воздуха, представленные в рядах инструментальных метеорологических наблюдений с конца XIX века до настоящего времени. Обнаружена фазовая синхронизация этих вариаций во временных масштабах одного, двух и шести-семи десятилетий и отсутствие такой синхронизации в промежуточных масштабах, где амплитуды вариаций меньше. Сравнение полушарных вариаций температуры в длительных интегрированиях климатической модели Института вычислительной математики РАН (эксперимент *ri-Control*, когда внешние форсинги принимались равными их средним значениям в доиндустриальный период) показало отсутствие такой синхронизации. Однако в эксперименте *historical*, когда принимались во внимание квазипериодические изменения приходящей солнечной радиации в цикле солнечной активности, фазовая синхронизация была обнаружена в масштабе двух десятилетий. Все это позволяет думать, что в формировании спектра температурных вариаций в рассматриваемом диапазоне масштабов (от года до половины столетия) важную роль играют очень небольшие периодические изменения внешнего форсинга климатической системы.

Ключевые слова. Фазовая синхронизация, вариации температуры, Северное полушарие, Южное полушарие, климатическая модель, кроссвейвлетный анализ.

Введение

Широко распространено мнение, что вариации всех масштабов в климатической системе являются хаотическими, т.е. неустойчивыми к малым возмущениям и потому непредсказуемыми. Причиной хаотичности является нелинейность динамики климатической системы. При этом меняющиеся

внешние воздействия на эту систему, такие как циклические изменения солнечной активности и т. п., обычно рассматриваются как малозначительные.

Целью настоящей работы является указать, что в формировании климатических вариаций некоторую роль играют периодические внешние воздействия на климатическую систему, в том числе воздействие, связанное с очень небольшими изменениями приходящей солнечной радиации в цикле солнечной активности. Для этого вычисляются кросскорреляции между изменениями солнечной активности и средними температурами обоих полушарий в широком диапазоне временных масштабов.

Акцент сделан на временную синхронность вариаций среднеполушарных температур с периодами около двух десятилетий и их синхронность с соответствующими периодическими колебаниями приходящей солнечной радиации. То, что именно колебания в цикле Хейла приходящей радиации являются причиной появления синхронизованных температурных вариаций доказываются данными двух численных интегрирований климатической модели ИВМ РАН. В эксперименте, не учитывающем колебания приходящей радиации, синхронизованные вариации среднеполушарных температур не появляются. Однако во втором эксперименте, в котором колебания приходящей радиации учтены, динамика температурных колебаний в масштабах около двух десятилетий оказывается чрезвычайно похожей на соответствующую динамику в данных наблюдений.

Колебания приходящей радиации в цикле Хейла чрезвычайно малы. Кроме того, свойства подстилающей поверхности у обоих полушарий сильно различаются. Поэтому кажется удивительным, как при всем при том среднеполушарные температуры могут варьировать синхронно.

Оказывается, этот вопрос занимал исследователей еще очень давно. Самая ранняя публикация по этому вопросу, которую авторам данной работы удалось найти, это статья (Rubin, 1955). Из ранних отечественных публикаций можно упомянуть статью (Солянкин, 1966). В то время было еще очень мало фактических метеорологических данных, поэтому рассмотрение в этих работах было, по сегодняшним меркам, переупрощенным.

В последующем появлялись все новые работы, основанные, в основном, на синоптическом подходе и простейших статистических выкладках. Из их числа можно упомянуть (Мартазинова, Тимофеев, 2008; Buzzi, Tosi, 1988; Ismail, 1990). Конечно, при этом не обошлось без ссылок на важную роль солнечной активности (см., например, (Галич, Астрахович, 2010)).

Однако появлялись также работы, например, (Khokhlov et al., 2006, Duane, 1997, Duane et al., 1999, Duane, Tribbia, 2001), в которых вопрос о природе межполушарной синхронизации климатических вариаций рассматривался теоретически и с помощью численных экспериментов на очень упрощенных климатических моделях. Основная идея этих работ состояла в том, что синхронизация обусловлена слабыми нелинейными взаимодействиями между климатическими модами обоих полушарий, как в известном эксперименте Гюйгенса с двумя маятниками, подвешенными на общую опору.

Важно отметить, что в упомянутых работах не рассматривалось то влияние на синхронизацию, которое может оказывать периодическая внешняя сила, одинаково воздействующая на оба маятника. Между тем, синхронизирующий эффект периодической внешней силы был обнаружен еще в работах А. Пуанкаре. Хорошее изложение этого содержится в книге (Блехман, 1971). К настоящему времени он хорошо изучен в математической теории нелинейных динамических систем.

В Секции 2 рассматриваются временные ряды инструментальных наблюдений приземной температуры воздуха, осредненных в масштабах полушарий, которые продуцированы в трех мировых центрах мониторинга современного климата. С помощью специально разработанной техники оценки помасштабных кросскорреляций, основанной на вейвлетах, устанавливается практическая идентичность этих рядов. Это позволяет ограничиться в последующем исследовании рассмотрением рядов, продуцированных только в одном из мониторинговых центров. В данной работе выбраны ряды английского центра (HadCRUT4).

В Секции 3 вейвлетный кросскорреляционный анализ используется для того, чтобы выявить наличие или отсутствие фазовой синхронизации у вариаций средних температур Северного и Южного полушарий во временных масштабах от года до половины столетия. Особое внимание уделено рассмотрению масштаба 20-ти лет, где фазовая синхронизация очень сильна, и где она, по-видимому, вызывается откликом климатической системы на изменения приходящей солнечной радиации соответствующего периода или другие внешние воздействия, такие как изменение концентрации вулканического и антропогенного аэрозолей.

В Секции 4 аналогичный анализ делается для рядов, полученных при длительных интегрированиях климатической модели Института вычислительной математики РАН. Используются интегрирования, выполненные без учета вариаций внешних воздействий (эксперимент *ri-Control*) и с их учетом (эксперимент *historical*). Выявляются сходства и отличия в характере фазовой синхронизации разномасштабных температурных вариаций в этой модели от реальности. Обсуждается роль изменений приходящей солнечной радиации в фазовой синхронизации полушарных температурных вариаций 20-летнего масштаба.

В заключительном разделе суммируются результаты проведенных исследований.

Исходные температурные ряды и метод их обработки

В качестве исходных в данной работе используются ряды среднемесячных приземных температур воздуха (температур водной поверхности), осредненных в масштабах полушарий. Эти ряды построены и постоянно дополняются новыми данными в трех мировых центрах мониторинга современного климата: Отделе климата университета Восточной Англии (HadCRUT4), Американском климатическом центре (NCDC) и Американском центре космических

исследований им. Годдарда (GISS). Все ряды берутся длиной в 138 лет (с 1880 по 2018 год).

Предварительно производится скользящее 12-месячное осреднение этих рядов, и исключаются их линейные тренды. Затем ряды нормируются, чтобы иметь нулевое среднее и единичную дисперсию. Этот препроцессинг делается с целью уменьшить краевые искажения результатов вейвлетных преобразований (ВП), которые неизбежно возникают при преобразовании рядов, имеющих конечную длину. Области, внутри которых краевые искажения потенциально существуют, отмечаются на всех картинах ВП черными дугами.

Известно, что в прошлые годы температурные вариации в рядах всех трех мониторинговых центров заметно отличались друг от друга. Особенно это было заметно при сравнении английского ряда (версия HadCRUT3) и ряда Годдардовского центра, а также при сравнении всех данных, относящихся к Южному полушарию. Однако в современной версии HadCRUT4 вариации температуры всех временных масштабов от года до примерно половины столетия выглядят почти такими же, как в современных версиях рядов обоих американских мониторинговых центров.

Сравнение этих вариаций в рядах всех трех мониторинговых центров друг с другом делается в настоящей работе с помощью специально разработанной техники, основанной на вейвлетах.

Само по себе ВП дискретных и конечных временных рядов

$$WT_b(a) = a^{-1/2} \sum_{t=t_1}^{t=t_n} X(t) G((t-b)/a) \quad (1)$$

хорошо известно. В (1) $X(t)$ – преобразуемый ряд конечной длины и единичной дискретности, b – сдвиг по времени ($t_1 \leq b \leq t_n$, n – длина ряда), a – вейвлетный масштаб ($a > 0$), $WT_b(a)$ – величина вейвлетного преобразования для масштаба a и сдвига b .

Если используется вейвлетная функция Морле

$G(t) = \pi^{-1/4} \exp\{i\omega t\} \exp\{-t^2/2\}$, то величина $WT_b(a)$ является комплексной $WT_b(a) = \text{Re}WT_b(a) + \text{Im}WT_b(a)$. Заметим, что значение $\omega=6.2035$ обеспечивает точное равенство вейвлетного и обычного временного масштаба. Именно это значение используется в данной работе.

В работах (Вакуленко и др., 2004, Вакуленко и др., 2016а, Вакуленко и др., 2016b, Вакуленко и др., 2017) для количественного сравнения вариаций разного временного масштаба и их изменений со временем была разработана специальная кросскорреляционная техника, основанная на ВП (1). Согласно этой технике сначала вычисляется произведение $CROSSWT_b(a) = \text{Re}WT_{1_b}(a) \cdot \text{Re}WT_{2_b}(a)$ величин ВП для двух сравниваемых рядов при всех значениях b и a из заданного диапазона. Результат этого вычисления представляется как картина CrossWT на полуплоскости (b, a) , как это делается и при обычном ВП. Области полуплоскости, где произведение является положительным, закрашиваются оттенками серого цвета, пропорционально величине произведения. Те

области, где произведение отрицательно, оставляются белыми, независимо от величины модуля произведения.

Ясно, что, если при ВП используется вейвлетная функция Морле, то первые области соответствуют синфазным вариациям в сравниваемых рядах, а вторые области – противофазным. Затем, на полученную картину CrossWT накладываются жирные линии, соответствующие нулевым значениям $ReWT1_b(a)$. Это позволяет видеть, вариации какого ряда опережают вариации (или следуют за вариациями) другого ряда в данном конкретном масштабе и в данное конкретное время.

Например, пусть в некотором вейвлетном масштабе в некоторый момент времени $CROSSWT_b(a) > 0$, а спустя некоторое время эта величина становится отрицательной. На картине CrossWT этому соответствует сначала область, закрашенная серым цветом, а затем белая область. Если линия, разделяющая эти области, является жирной, то это значит, что сначала соответствующие величины ВП в обоих рядах ($ReWT1_b(a)$ и $ReWT2_b(a)$) были синфазными. Например, обе они были положительными (отрицательными). Но затем величина первого ряда сменила свой знак, а величина второго ряда продолжала оставаться такой же, как и ранее. В противном случае, когда разделяющая линия является тонкой, первой сменила свой знак величина ВП второго ряда.

Здесь уместно отметить, что вышеописанная техника использовалась сначала с вещественными вейвлетными функциями – первой и второй производными гауссиана. Здесь же используется комплексная функция Морле. По аналогии с обычным взаимным спектральным анализом надо бы принять во внимание не только вещественную, но и мнимую компоненту этой функции. Так сделано в часто цитируемой работе (Jevrejeva et al., 2003). Однако картина CrossWT при этом получается трудно читаемой. Есть также проблема с осреднением получаемых результатов (Torrence, Compo, 1998). Вышеописанная техника хороша в том отношении, что ее выходной продукт очень нагляден и легко читается. Но этот продукт не содержит точных значений разностей фаз вариаций в сравниваемых рядах, а их когерентность вообще не оценивается. Однако во многих приложениях, включая описываемое в данной работе, вполне достаточно знать, колебания в каком ряду лидируют, а в каком запаздывают.

Как эта кроссвейвлетная техника работает при сравнении рядов HadCRUT4 и GISS, осредненных в масштабе Северного полушария, иллюстрирует рисунок 1. Видно, что подавляющая часть картины CrossWT этих рядов покрыта областями, закрашенными серым цветом и окаймленными жирными линиями. Это означает, что практически все температурные вариации в обоих рядах синфазны. Это подтверждается исключительно большими (от ~ 0.9 до ~ 1.0) средними по времени помасштабными (вейвлетными) кросс-корреляциями, чей график показан справа от картины CrossWT на рис. 1.

Небольшие исключения видны только в некоторые годы. Так, в конце 1930 – начале 1940 годов в вейвлетных масштабах 4-8 лет видны очень небольшие белые области, окаймленные тонкими линиями с обеих сторон. Это значит, что величина $ReWT2_b(a)$ на какое-то время (около двух лет) меняла свой знак, а

затем возвращалась к прежнему значению, при том что величина $ReWT1_b(a)$ вообще не меняла свой знак. Появление этих различий в рядах HadCRUT4 и GISS можно связать со значительным уменьшением числа метеорологических наблюдений в военные годы. Вероятно, при этом различия в методиках усвоения наблюдений, используемых в разных мониторинговых центрах, становятся наиболее заметными. Похожие белые области видны также в 1950-1960 годы в масштабах около 16 и около 50 лет. Их появление объяснить трудно.

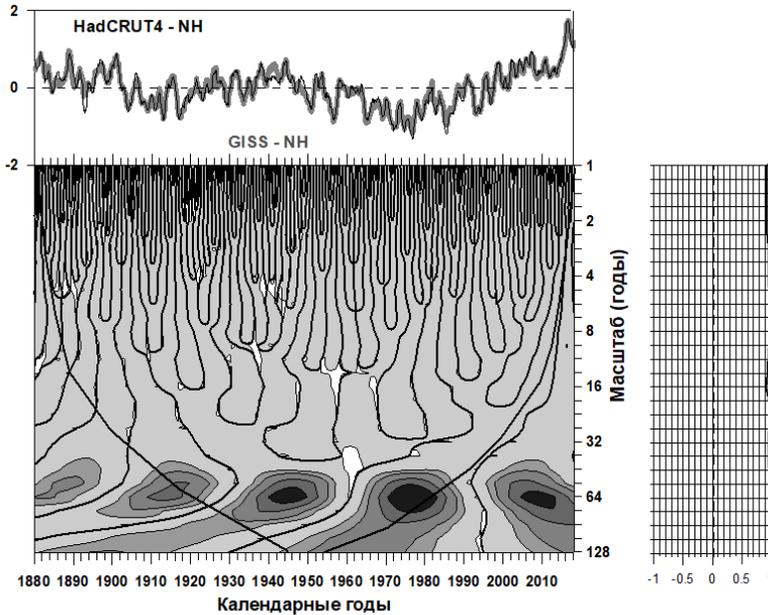


Рисунок 1. Ряды средних приземных температур Северного (черная линия) полушария Построены в английском (HadCRUT4 – черная линия) и американском (GISS – серая линия) центрах мониторинга изменений современного климата за период инструментальных метеорологических наблюдений (вверху), картина кроссвейвлетного преобразования этих рядов (внизу) и график средних за весь период наблюдений вейвлетных кросскорреляций этих рядов

Кроссвейвлетное сравнение разномасштабных вариаций средних температур Северного и Южного полушарий

Очень большое сходство в рядах средних полушарных температур, продуцированных разными мониторинговыми центрами, является ожидаемым. Однако то, что при этом у рядов каждого из мониторинговых центров весьма сходны вариации средних температур Северного и Южного полушарий, является неожиданным. На рис. 2 показана картина CrossWT и график средних по времени вейвлетных кросскорреляций для рядов обоих полушарий, которые продуцированы в английском центре. Для американских рядов картины и графики очень похожи, поэтому они не показываются.

Первое, что обращает на себя внимание в картине CrossWT на рис. 2, это – полоса из пяти больших серых областей, центрированная около вейвлетного

масштаба в 64 года. Эти области почти всюду окаймлены жирными линиями. Эта полоса соответствует температурному колебанию, известному как 65-70-летнее колебание (Schlesinger, Ramankutty, 1994). Очень небольшие по продолжительности области белого цвета, видимые справа и несколько вверх (в более короткие вейвлетные масштабы) от каждой из больших серых областей, указывают на то, что в Южном полушарии это колебание меняет знак на 2-4 года раньше, чем соответствующее колебание в Северном полушарии. Но в целом, можно сказать, что полушарные колебания Шлезингера-Раманкутти синфазны.

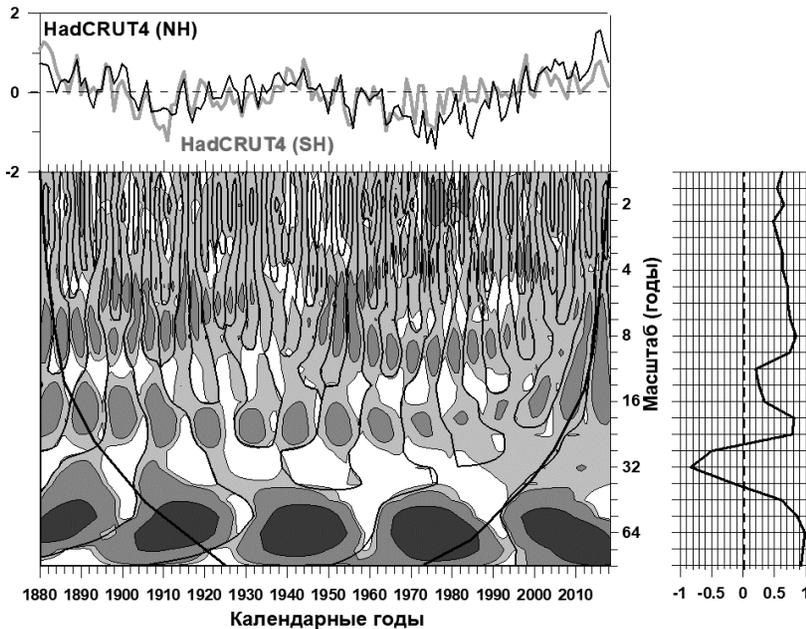


Рисунок 2. То же, что на рисунке 1

Сопоставляются ряды средних приземных температур Северного (черная линия) и Южного (серая линия) полушарий, построенные в английском (HadCRUT4) центре мониторинга

Показанный справа на рис. 2 график средних по времени кросскорреляций между обоими полушарными колебаниями Шлезингера-Раманкутти превышает 0.95. Это свидетельствует о практически взаимно однозначной связи между полушарными вариациями температуры рассматриваемого масштаба. Заметим, что еще в работах (Sonechkin et al., 1999; Серых, Сонечкин, 2017a) было указано на синфазные проявления этого колебания в рядах самых разных метеорологических элементов.

Следующей обращающей на себя внимание особенностью картины CrossWT на рис. 2 является полоса из серых областей, которая центрирована около вейвлетного масштаба в 20 лет. Эти области также почти всюду окаймлены с боковых сторон жирными линиями, что указывает на синфазность соответствующих температурных вариаций. Видимое, особенно на правом краю картины, смещение этих серых полос в более короткие вейвлетные масштабы является, конечно, следствием остаточных краевых искажений ВП.

График средних по времени кросскорреляций показывает для этой полосы величину ~ 0.80 .

Заметим, что обе ранее указанные на этой картине полосы серых областей вблизи вейвлетных масштабов в 64 и 20 лет разделены полосой белых областей в вейвлетных масштабах, центрированных около 32 лет. Правда, эта полоса заканчивается справа большой серой областью. Но ее существование можно считать следствием краевого искажения ВП. Окаймление небольших серых областей внутри этой, в целом белой, полосы различно. Оно осуществляется или полужирными, или тонкими линиями. Средние кросскорреляции для рассматриваемого сейчас временного масштаба понижаются до ~ 0.80 , но говорить о полной противофазности температурных вариаций этого масштаба, вероятно, не стоит. Слишком по-разному выглядят соответствующие области на картине CrossWT.

Кроссвейвлетное сравнение разномасштабных вариаций средних температур Северного и Южного полушарий в модели ИВМ РАН

В работах (Серых, Сонечкин, 2017a; Серых, Сонечкин, 2017b; Серых, Сонечкин, 2017c; Serykh, Sonechkin, 2019) было указано, что главные пики спектральной плотности в рассмотренных там спектрах хорошо совпадают с суб- и супергармониками трех внешних периодичностей, потенциально влияющих на динамику климата. Это – чандлеровское колебание полюсов Земли (главный период ~ 1.2 года), лунно-солнечная нутация оси вращения Земли (главный период ~ 18.6 года) и ~ 11 -летний цикл числа пятен на Солнце.

Чтобы подтвердить существенность воздействий этих периодичностей на климатическую систему, полезно рассмотреть результаты длительных интегрирований современных детализованных моделей климатической системы, в которых приняты (не приняты) во внимание те или иные из указанных внешних воздействий на климатическую систему. Такие модели созданы в рамках международного проекта сравнения климатических моделей (Coupled Model Intercomparison Project, stage 5 – CMIP5).

Со многими моделями этого Проекта выполнены два типа длительных интегрирований. Во-первых, это – так называемый *pi-Control* эксперимент, когда неадиабатические воздействия на климатическую систему принимались соответствующими тем, что предполагаются существовавшими в доиндустриальную эпоху. В частности, в этом эксперименте приходящая солнечная радиация принималась неизменной. Во-вторых, это – *historical* эксперимент, когда, согласно всем имеющимся данным, учитывались изменения количества и состава аэрозолей и концентрации парниковых газов в атмосфере, а также приходящей солнечной радиации в цикле солнечной активности.

Одной из моделей, с которыми были выполнены оба эксперимента, является модель, разработанная в Институте Вычислительной Математики РАН (INM (Rus)). Ее описание можно найти в (Володин, 2015, Володин, 2016, Володин, 2017). Эта модель неплохо воспроизводит многие особенности общей

циркуляции атмосферы в межгодовых-декадных временных масштабах (см., например, независимую оценку в (Серых, 2018)). Однако подобно всем другим моделям, участвующим в Проекте CMIP5, положения пиков во временных энергетических спектрах этой модели отличаются от таковых, найденных по данным метеорологических наблюдений в работах (Серых, Сонечкин, 2017a; Серых, Сонечкин, 2017b; Серых, Сонечкин, 2017c; Serykh, Sonechkin, 2019). Вероятной причиной этого является неучет в моделях CMIP5 некоторых из вышеуказанных внешних периодичностей.

Вверху на рис. 3 показаны ряды средних температур Северного и Южного полушарий, полученные по модели INM (Rus) в эксперименте pi-Control. Ниже показана картина CrossWT этих рядов, а справа от нее – график средних помасштабных кросскорреляций между этими рядами. Видно, что имеет место полное несходство этой картины CrossWT и средних кросскорреляций с теми, что показаны на рис. 2 для рядов фактических средних полушарных температур. Особенно надо подчеркнуть нечеткость полосы серых областей вблизи вейвлетного масштаба 64 года, отсутствие такой полосы вблизи масштаба 20 лет, а также разделяющей их полосы белых областей вблизи масштаба 32 года, где взамен видна довольно четкая серая полоса.

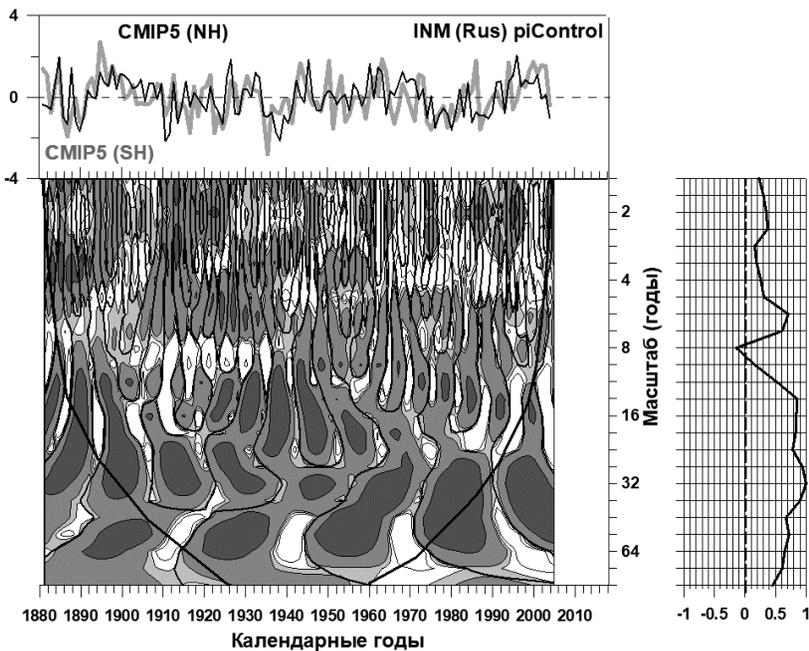


Рисунок 3. То же, что на рисунке 2

Сопоставляются ряды средних приземных температур Северного (черная линия) и Южного (серая линия) полушарий, построенные по данным длительного интегрирования климатической модели Института вычислительной Математики РАН (эксперимент pi-Control). Неадиабатические внешние воздействия на климатическую систему приняты при интегрировании равными тем воздействиям, которые принято считать существовавшими в среднем в доиндустриальную эпоху. Вариациями приходящей солнечной радиации в цикле солнечной активности пренебрежено

Различие в средней по времени кросскорреляции для этого последнего вейвлетного масштаба особенно разительно. Для реальных рядов она была сильно отрицательной (~ -0.80), а для модельных рядов она оказалась сильно положительной (~ 1.0). Взамен, модельная средняя по времени кросскорреляция оказалась слабо отрицательной (~ -0.15) вблизи вейвлетного масштаба 8 лет, где фактические ряды давали высокую положительную среднюю кросскорреляцию (~ 0.80). Также существенно различаются средние по времени кросскорреляции в межгодовых масштабах. В реальных рядах они довольно высоки (от ~ 0.6 до ~ 0.8), а в модельных рядах не превышают ~ 0.4 , исключая только масштаб вблизи 6 лет, где средняя модельная кросскорреляция увеличивается до ~ 0.7 .

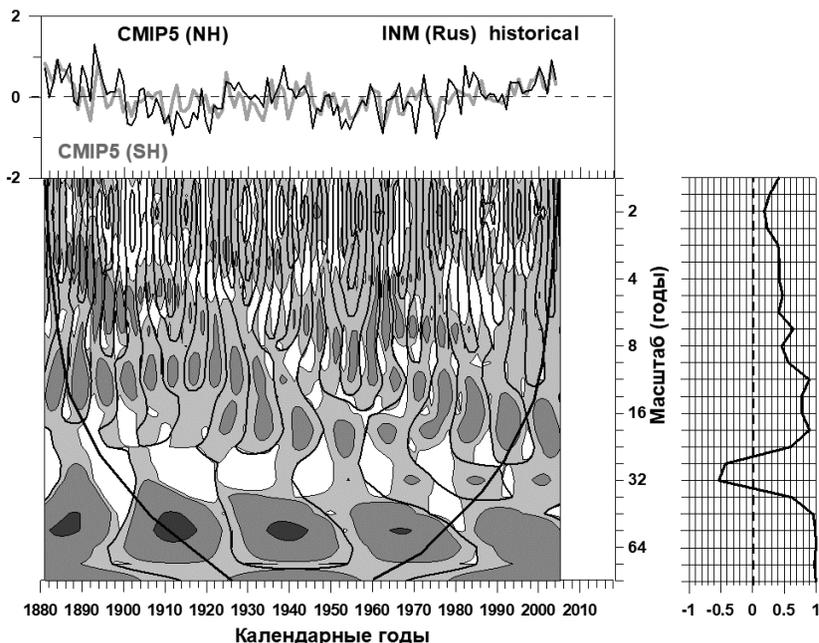


Рисунок 4. То же, что на рисунке 2

Сопоставляются ряды средних приземных температур Северного (черная линия) и Южного (серая линия) полушарий, построенные по данным длительного интегрирования климатической модели Института вычислительной Математики РАН (эксперимент historical). Неадиабатические внешние воздействия на климатическую систему приняты при интегрировании переменными, соответствующими их существующим оценкам. В том числе, учтены очень небольшие изменения приходящей солнечной радиации в цикле изменений солнечной активности

На рис. 4 показаны графики и картина CrossWT для эксперимента historical. Здесь появляется неплохое соответствие с реальными рядами в том, что касается относительно больших вейвлетных масштабов (более 16 лет). В том числе, вблизи масштаба 64 года хорошо видна полоса серых областей, оконтуренных жирными линиями, почти такая же, как видимая в картине CrossWT реальных рядов на рис. 2. Средняя по времени кросскорреляция у этой полосы близка к 1.0, как и у реальных рядов. Также вблизи масштаба 32 года хорошо прослеживается полоса белых областей.

Однако положение отдельных белых областей и характер их оконтуривания отличаются от таковых на рис. 2. При этом доля участков областей, закрашенных серым, здесь больше, чем на рис. 2. В результате, средняя по времени кросскорреляция оказывается лишь слабо отрицательной (~ -0.5), хотя она была существенно отрицательной (~ -0.8) у реальных рядов.

Полоса оконтуренных с боков жирными линиями серых областей вблизи масштаба 20 лет также заметна на рис. 4. Но она не столь четкая в начальные годы (1880-1920), как у реальных рядов на рис. 2. Однако за счет последних лет средняя по времени кросскорреляция у этой модельной полосы даже несколько выше (~ 0.9), чем у полосы реальных рядов на рис. 2.

Описанные сходства в характере фазовой синхронизации между реальными рядами и рядами эксперимента *historical* не распространяются на более короткие масштабы. В среднем кросскорреляции для вейвлетных масштабов вблизи 11 лет у модельных рядов весьма велики (~ 0.9), в то время как у реальных рядов на рис. 2 они почти отсутствуют (~ 0.2). Зато средние по времени модельные кросскорреляции уменьшались до ~ 0.45 вблизи масштаба 8 лет, где у реальных рядов, наоборот, был очередной максимум таких кросскорреляций (~ 0.85). Наконец, в еще более коротких масштабах (менее 8 лет) модельные средние по времени кросскорреляции повсеместно уступают таковым у реальных рядов. Сходство с реальностью также отсутствует в самых коротких вейвлетных масштабах. Повторяя утверждение работы (Серых, 2018), можно сказать, что одна из возможных причин несходства состоит в неучете в модели ИВМ РАН влияния чандлеровского колебания полюсов и лунно-солнечной нутации на климатическую систему.

Заключение

В данной работе впервые выявлено, что у вариаций средних температур Северного и Южного полушарий, представленных в рядах инструментальных метеорологических наблюдений, имеют место резкие изменения межполушарной фазовой синхронизации при довольно небольших изменениях временных масштабов. Во временных масштабах около 64, 20 и 8 лет фактически существует взаимно однозначная связь между средними полушарными вариациями. При этом амплитуды этих вариаций велики. Вместе с тем, такая связь отсутствует между вариациями в масштабах около 32 и 12 лет. Амплитуды этих несинхронизованных вариаций столь невелики, что их происхождение может быть полностью отнесено на счет ошибок метеорологических наблюдений.

Возможными причинами этой высокой фазовой синхронизации могут быть внешние периодические воздействия на климатическую систему, одинаковые для обоих полушарий. Это предположение подкрепляется анализами фазовых синхронизаций средних полушарных температур по данным длительных интегрирований климатической модели Института Вычислительной Математики РАН, выполненных без учета и с учетом некоторых подобных внешних периодичностей.

Найдено, что моделированные температурные ряды обнаруживают резкие изменения межполушарной фазовой синхронизации в диапазоне временных масштабов нескольких десятилетий, подобные тем, что имеют место у реальных рядов, но лишь при обязательном условии, что при интегрировании модели приняты во внимание небольшие изменения приходящей солнечной радиации в цикле солнечной активности и других воздействий (эксперимент historical).

Что касается более коротких временных масштабов (менее примерно 16 лет), то ни в эксперименте *ri-Control*, ни в эксперименте *historical* модель ИВМ РАН не принимает во внимание внешние периодические воздействия на климатическую систему, связанные с указанными в работах (Серых, Сонечкин, 2017а, Серых, Сонечкин, 2017b, Серых, Сонечкин, 2017с, Serykh, Sonechkin, 2019) чандлеровским колебанием и лунно-солнечной нутацией оси вращения Земли. Именно этим можно объяснить, что оба указанных модельных эксперимента не воспроизводят те особенности фазовой синхронизации относительно короткопериодных температурных вариаций, которые свойственны реальным рядам средних полушарных температур.

При выполнении данной работы Вакуленко и Сонечкин пользовались финансовой поддержкой по теме государственного задания № 0149-2019-0003.

Список литературы

Блехман И.И. 1971. Синхронизация динамических систем. – М., Наука, 896 с.

Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., Сонечкин Д.М. 2004. Доказательство упреждения изменений концентрации парниковых газов вариациями температуры в данных станции «Восток». – Доклады АН, т. 396, № 5, с. 686-690.

Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Парренин Ф., Сонечкин Д.М. 2016а. Исследование разномасштабных взаимосвязей между изменениями приземной температуры воздуха и концентрации CO_2 в атмосфере. – Лед и снег, т. 56, № 4, с. 533-544.

Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М. 2016b. О соотношениях лидирования - запаздывания между атмосферными трендами температуры и концентрации углекислого газа в период плейстоцена. – Доклады АН, т. 467, № 6, с. 709-712.

Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М. 2017. О связи антропогенного роста концентрации углекислого газа в атмосфере и современного потепления. – Доклады АН, т. 477, № 1, с. 87-91.

Володин Е.М. 2015. Естественные колебания климата на временных масштабах порядка десятилетия. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 78-95.

Володин Е.М. 2016. Представление потоков тепла, влаги и импульса в климатической модели. Потоки с поверхности. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 28-42.

Володин Е.М. 2017. Представление потоков тепла, влаги и импульса в климатической модели. Радиационные потоки. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 3, с. 5-15.

Галич У.Ф., Астрахович А.О. 2010. Крупномасштабные циркуляционные атмосферные процессы в западном секторе Южного полушария и их взаимосвязь с солнечной активностью. – Украинский гидрометеорологический журнал, № 7, с. 95-102.

Мартазинова В.Ф., Тимофеев В.Е. 2008. Современное состояние атмосферной циркуляции воздуха в Северном и Южном полушарии и региональные климатические особенности в Атлантико-Европейском секторе и районе Антарктического полуострова. – Проблемы Арктики и Антарктики, № 3(80), с. 17-37.

Серых И.В. 2018. О динамике и структуре глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности. – Океанологические исследования, т. 46, № 1, с. 14-28.

Серых И.В., Сонечкин Д.М. 2017а. О проявлениях движений полюсов Земли в ритмах Эль-Ниньо – Южного колебания. – Доклады АН, т. 472, № 6, с. 716-719.

Серых И.В., Сонечкин Д.М. 2017б. Сопоставление временных энергетических спектров индексов Эль-Ниньо – Южного колебания и глобальных полей температуры и атмосферного давления в приповерхностном слое. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 2, с. 144-155.

Серых И.В., Сонечкин Д.М. 2017с. Хаос и порядок в атмосферной динамике. 2. Междугодовые ритмы Эль-Ниньо – Южного колебания. – Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика, т. 25, № 5, с. 5-25.

Солянкин Е.В. 1966. Биологические и океанографические условия образования промысловых скоплений рыб. – Труды ВНИРО, т. 60, с. 49-58.

Buzzi A., Tosi E. 1988. Low-frequency variability of the atmospheric circulation: a comparison of statistical properties in both hemispheres and extreme seasons. – Nuovo Cimento C., vol. 11, No. 5-6, pp. 467-488.

Duane G.S. 1997. Synchronized chaos in extended systems and meteorological teleconnections. – Physical Review E., vol. 56, pp. 6475-6482.

Duane G.S., Tribbia J.J. 2001. Synchronizes chaos in geophysical fluid dynamics. – Phys. Rev. Lett., vol. 86, pp. 4298-4301.

Duane G.S., Webster P.J., Weiss J.B. 1999. Co-occurrence of Northern and Southern Hemisphere blocks as partially synchronized chaos. – Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 56, pp. 4183-4205.

Ismail S.A. 1990. The interrelations between the two hemispheres and long-range forecasting. – Theoretical and Applied Climatology, vol. 41, No. 4, pp. 201-211.

Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. 2003. Influence of the Arctic oscillation and El-Nino – Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: the wavelet approach. – Journal of Geophysical Research, vol. 108, p. 4677. Available at: <https://doi.org/10.1029/2003jD003417>.

Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S. 2006. On the nonlinear interactions between global teleconnection patterns. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 132, pp. 447-465.

Rubin M.J. 1955. An investigation of relationship between northern and southern hemispheres meteorological parameters. – Notes, No. 4, pp. 122-126.

Schlesinger M. E., Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. – Nature, vol. 367, pp. 723-726.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. 2019. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. – Theoretical and Applied Climatology, pp. 1-18. URL: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02761-0>.

Sonechkin D. M., Astafyeva N. M., Datsenko N. M., Ivachtchenko N. N., Jakubiak B. 1999. Multiscale Oscillations of the Global Climate System as Revealed by Wavelet Transform of Observational Data Time Series. – Theoretical and Applied Climatology, vol. 64, pp. 131-142.

Torrence D.C., Compo G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. – Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 79(1), pp. 61-78.

Статья поступила в редакцию: 12.08.2019 г.

После переработки: 26.09.2019 г.

FEATURES OF SYNCHRONIZATION OF HEMISPHERIC VARIATIONS OF TEMPERATURE AT DECADAL SCALE USING DATA OF INSTRUMENTAL OBSERVATIONS AND SIMULATION DATA OF THE INM RAS CLIMATE MODEL

N.V. Vakulenko^{1)}, E.M. Volodin²⁾, D.M. Sonechkin^{1),3)}*

¹⁾ P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovsky pr., 117997, Moscow, Russian Federation

²⁾ G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, 8, Gubkina, 119333, Moscow, Russian Federation

³⁾ Hydrometeorological Center of Russia, 11-13, Bol. Predtechensky per., 123242, Moscow, Russian Federation; *vanava139@yandex.ru

Abstract. Using the technique of wavelet cross-correlations, the features of hemispheric variations in surface air temperature are considered. The variations are presented in the time series of instrumental meteorological observations from the end of the 19th century to the present. The phase synchronization of these variations is found on the time scales of one, two, and six to seven decades. Such synchronization is not seen on intermediate time scales, where the amplitudes of the variations are smaller. A comparison of the hemispheric temperature variations in the long integration of the climatic model of the Institute of Computational Mathematics of the Russian Academy of Sciences (pi-Control experiment, when external forcing was taken equal to their mean values over the pre-industrial period) did not show such synchronization. However, in historical experiment, in which the quasiperiodic changes in the incoming solar radiation flux modulated by solar activity were taken into account, the phase synchronization was detected on a two-decade scale. This allows to hypothesize that very small periodic changes in external forcing of the climate system may play an important role in the formation of temperature variations' spectrum within considered range of scales (from a year to half a century).

Keywords. Phase synchronization, temperature variations, Northern Hemisphere, Southern Hemisphere, climate model, cross-wavelet analysis.

References

Blekhman I.I. 1971. *Sinhronizaciya dinamicheskikh system* [Synchronization of dynamic systems]. Moscow, Nauka, 896 p.

Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Monin A.S., Sonechkin D.M. 2004. Dokazatel'stvo uprezhdeniya izmenenij koncentracii parnikovyh gazov variaciyami temperatury v dannyh stancii «Vostok» [Proof of anticipation of changes in greenhouse gas concentrations by temperature variations in Vostok station data]. *Doklady AN – Reports of the Academy of Sciences*, vol. 396, no. 5, pp. 686-690.

Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Parrenin F., Sonechkin D.M. 2016a. Issledovanie raznomasshtabnyh vzaimosvyazej mezhdru izmeneniyami prizemnoj temperatury vozduha i koncentracii CO₂ v atmosphere [Study of multi-scale relationships between changes in surface air temperature and CO₂ concentration in the atmosphere]. *Led i sneg – Ice and Snow*, vol. 56, no. 4, pp. 533-544.

Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M. 2016b. O sootnosheniyah lidirovaniya - zapazdyvaniya mezhdru atmosferynymi trendami temperatury i koncentracii uglekislogo gaza v period pliocena [Lead-Lag Relationships between Atmospheric Trends of Temperature and Carbon Dioxide Concentrations during the Pliocene]. *Doklady AN – Reports of the Academy of Sciences*, vol. 467, no. 6, pp. 709-712.

Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M. 2017. O svyazi antropogenogo rosta koncentracii uglekislogo gaza v atmosfere i sovremennogo potepleniya [The Connection between the Growth of Anthropogenic Carbon Dioxide in the Atmosphere and the Current Climate Warming]. *Doklady AN – Reports of the Academy of Sciences*, vol. 477, no. 1, pp. 87-91.

Volodin E.M. 2015. Estestvennye kolebaniya klimata na vremennyh masshtabah poryadka desyatiletiya [Natural climate fluctuations on time scales of about a decade]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 1, pp. 78-95.

Volodin E.M. 2016. Predstavlenie potokov tepla, vlagi i impul'sa v klimaticheskoj modeli. Potoki s poverhnosti [Representation of heat, moisture and momentum fluxes at surface]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 1, pp. 448-466.

Volodin E.M. 2017. Predstavlenie potokov tepla, vlagi i impul'sa v klimaticheskoj modeli. Radiacionnye potoki [Representation of heat, moisture and momentum fluxes in the climate models. Radiation fluxes]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 3, pp. 5-15.

Galich U.F., Astrahovich A.O. 2010. Krupnomasshtabnye cirkulyacionnye atmosferynye processy v zapadnom sektore yuzhnogo polushariya i ih vzaimosvyaz' s solnechnoj aktivnost'yu [Large-scale circulation atmospheric processes in the western sector of the South hemisphere and their connection with sun activity]. *Ukrainskij gidrometeorologicheskij zhurnal – Ukrainian hydrometeorological journal*, no. 7, pp. 95-102.

Martazinova V.F., Timofeev V.E. 2008. Sovremennoe sostoyanie atmosfernoj cirkulyacii vozduha v Severnom i Yuzhnom polusharii i regional'nye klimaticheskie osobennosti v Atlantiko-Evropejskom sektore i rajone Antarkticheskogo poluostrova [Current state of atmospheric air circulation in the Northern and southern hemispheres and regional climatic features in the Atlantic-European sector and the Antarctic Peninsula]. *Problemy Arktiki i Antarktiki – Problems of the Arctic and Antarctic*, no. 3(80), pp. 17-37.

Serykh I.V. 2018. O dinamike i strukture global'noj atmosfernoj oscillyacii v klimaticheskikh modelyakh i real'nosti [On the dynamics and structure of global atmospheric oscillation in climate models and reality]. *Okeanologicheskie issledovaniya – Oceanographic Research*, vol. 46, no. 1, pp.14-28.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. 2017a. O proyavleniyah dvizhenij polyusov Zemli v ritmah El'-Nin'o – Yuzhnogo kolebaniya [Manifestations of Motions of the Earth's Pole in the El Niño–Southern Oscillation Rhythms]. *Doklady AN – Reports of the Academy of Sciences*, vol. 472, no. 6, pp. 716-719.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. 2017b. Sopostavlenie vremennykh energeticheskikh spektrov indeksov El'-Nin'o – Yuzhnogo kolebaniya i global'nykh polej temperatury i atmosferного davleniya v pripoverhnostnom sloe [Comparison of time energy spectra of El Niño – southern oscillation indices and global temperature and atmospheric pressure fields in the near-surface layer]. *Fundamental'naya i priklad'naya klimatologiya – Fundamental and applied climatology*, no. 2, pp. 144-155.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. 2017c. Haos i poryadok v atmosfernoj dinamike. 2. Mezhdugodovye ritmy El'-Nin'o – Yuzhnogo kolebaniya [Chaos and order in atmospheric dynamics. Part 2. Interannual rhythms of the El Niño – Southern oscillation]. *Izvestiya VUZov. Prikladnaya Nelinejnaya Dinamika – Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, vol. 25, no. 5, pp. 5-25.

Solyankin E.V. 1966. Biologicheskie i okeanograficheskie usloviya obrazovaniya promyslovykh skoplenij ryb [Biological and oceanographic conditions for formation of commercial concentrations of fish]. *Trudy VNIRO – Proceedings of VNIRO*, vol. 60, pp. 49-58.

Buzzi A., Tosi E. 1988. Low-frequency variability of the atmospheric circulation: a comparison of statistical properties in both hemispheres and extreme seasons. – *Nuovo Cimento C.*, vol. 11, No. 5-6, pp. 467-488.

Duane G.S. 1997. Synchronized chaos in extended systems and meteorological teleconnections. – *Physical Review E.*, vol. 56, pp. 6475-6482.

Duane G.S., Tribbia J.J. 2001. Synchronizes chaos in geophysical fluid dynamics. – *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, pp. 4298-4301.

Duane G.S., Webster P.J., Weiss J.B. 1999. Co-occurrence of Northern and Southern Hemisphere blocks as partially synchronized chaos. – *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 56, pp. 4183-4205.

Ismail S.A. 1990. The interrelations between the two hemispheres and long-range forecasting. – *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 41, No. 4, pp. 201-211.

Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. 2003. Influence of the Arctic oscillation and El-Nino – Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: the wavelet approach. – *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, No. D21, 4677. Available at: <https://doi.org/10.1029/2003jD003417>.

Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S. 2006. On the nonlinear interactions between global teleconnection patterns. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 132, pp. 447-465.

Rubin M.J. 1955. An investigation of relationship between northern and southern hemispheres meteorological parameters. – Notes, No. 4, pp. 122-126.

Schlesinger M. E., Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. – Nature, vol. 367, pp. 723-726.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. 2019. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. – Theoretical and Applied Climatology, pp. 1-18. URL: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02761-0>.

Sonechkin D. M., Astafyeva N. M., Datsenko N. M, Ivachtchenko N. N., Jakubiak B. 1999. Multiscale Oscillations of the Global Climate System as Revealed by Wavelet Transform of Observational Data Time Series. – Theoretical and Applied Climatology, vol. 64, pp. 131-142.

Torrence D.C., Compo G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. – Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 79(1), pp. 61-78.