
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА КОМБИНИРОВАННЫХ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2020 г. О. М. Покровский^a, *, И. О. Покровский^a

^aРоссийский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: pokrov_06@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2019 г.

Выявлены и исследованы медленные климатические колебания температуры Мирового океана в северном полушарии за последние полтора века как отклик на соответствующие модуляции солнечной активности. Показано, что, учитывая нестационарный характер климатических рядов, наиболее подходящим методом анализа является расчет вейвлет спектров. Обнаружено, что максимумы 11-летних солнечных циклов подчиняются долговременным модуляциям с широким спектром квази-периодичностей, в котором выделяются: интервалы 60–80-летних, а также вековых и двухвековых колебаний. Указанные колебания транслируются в соответствующие осцилляции температуры поверхности океана (ТПО) в тропической зоне. В индексах Эль-Ниньо Niño 1,2 и Niño 4, ответственных за аномалии ТПО в акватории вблизи побережья Южной Америки и в центральной зоне Тихого океана, наблюдаются различные варианты упомянутых долговременных модуляций. Можно предположить, что 11-летние колебания солнечной активности транслируются в короткопериодные квазипериодические (5–10 лет) осцилляции индексов Эль-Ниньо. В свою очередь долговременные модуляции, которые мы называем, следуя предшествующим исследователям, фундаментальным климатическим колебанием (ФКК), переходят в колебания ТПО в Тихом и Атлантическом океанах, сохраняя квазипериодичности, заданные флуктуациями солнечной активности. В свою очередь ФКК повторяются в рядах следующих климатических индексов: декадное тихоокеанское (PDO) и североамериканское (PNA) колебания в Тихом океане, а также мультидекадное атлантическое колебание (AMO). Положительная фаза АМО, начавшаяся в середине 70-х годов усилила влияние парникового эффекта на потепление климата в последней четверти 20-го века, но стабилизация значений АМО в начале 21-го века привела к известной “климатической паузе” в потеплении. Показано, что для укороченных климатических рядов за последние полвека, когда роль спутниковых измерений была доминирующей в оценках аномалий ТПО и рассмотренных индексов мирового океана, получены аналогичные результаты для всех вейвлет спектров.

Ключевые слова: климатические колебания, вейвлет анализ, солнечная активность, температура поверхности океана, ряды океанических климатических индексов Niño 1,2, Niño 4, PDO, PNA, AMO, дистанционные измерения ТПО

DOI: 10.31857/S0205961420050073

ВВЕДЕНИЕ

Проблема выявления причин происходящих изменений климата относится к числу наиболее обсуждаемых не только в научном, но и во многих других сообществах. Очевидно, что факты потепления глобального климата, начиная с конца 70-х годов прошлого века, и рост концентрации углекислого газа в атмосфере с середины 20-го века (Keeling et al., 1976) являются вполне доказанными. Однако, также установленным является факт перехода от убывания к возрастанию глобальной температуры атмосферного воздуха зимой 1976–1977 гг. (Yasunaka, Hanawa, 2002; Swanson, Tsonis, 2009). При этом одновременно произошли изменения в поведении ряда климатических индексов (Ting,

Kushnir, Li, 2013;) по причине изменения временного тренда температуры поверхности океанов (Bond et al., 2003; Hurrell, 1995; Miller et al., 1994). Кардинальное изменение солёности субарктических вод Северной Атлантики (Dickson et al., 1988) могло послужить предвестием последующих изменений в Арктике. В работах (Polyakov, Johnson, 2000; Polyakov et al., 2003) выявлены многодекадные колебания площади арктического льда в 20-м веке. В тот период климатологи заговорили о фундаментальном климатическом колебании (ФКК) с квазипериодичностью 60–80 лет, достигнувшем минимума в 1976–1977 гг. и имеющем естественную природу. Влияние ФКК на климат в Северной Америке и Европе отмечен авторами (Sutton,

Hodson, 2005; Gray et al., 2010). Таким образом, в конце 20-го века произошло наложение двух факторов, способствовавших росту глобальной температуры: парниковый эффект роста CO_2 и положительная фаза ФКК. В пользу такого заключения свидетельствует появление “климатической паузы” в росте глобальной температуры в начале 21-го века, когда рост температуры сначала остановился, а затем замедлился.

Природа ФКК остается неясной. Остается не до конца исследованным вопрос о роли других климатообразующих факторов в период указанного потепления и о доле антропогенных выбросов в наблюдаемом росте концентрации CO_2 , а также других парниковых газов. Среди этих факторов медленно меняющиеся значения солнечной активности, средней температуры океана в зонах океанических течений, энерго- и влагообмен в системе атмосфера–океан, биомассы на суше и в океане, и даже такого экзотического параметра, как интенсивность галактического излучения, предположительно, влияющего на величину облачного покрытия (Pudovkin, Veretenko, 1995; Svensmark, Friis-Christensen, 1997).

Наличие не только прямых, но и недостаточно исследованных обратных связей в климатической системе Земли (атмосфера, океан, криосфера), ставит на повестку дня много новых научных вопросов. К сожалению, проблема глобального потепления не может быть полностью объяснена антропогенным фактором, т.е. воздействием хозяйственной деятельности человека. Это показано в ряде работ (см., например, Spenser, Braswell, 2007; Gray et al., 2010). Вопросы возникают не только у метеорологов, но и у океанологов (Broecker et al., 1985).

Основой для климатических исследований всегда был анализ временных рядов. Отличительной особенностью таких рядов является их квазипериодичность и нестационарность (изменение их вероятностных характеристик в зависимости от временной координаты). В климатической системе следует различать внешние и внутренние компоненты. Первым внешним модулем климатической системы, очевидно, является солнечный блок. Солнечная энергия запустила и поддерживает все природные процессы на Земле. Влияние измеренных изменений солнечной активности на климат до сих пор изучалась посредством численных экспериментов с МОЦАиО и признано малозначимым в отчетах МГЭИК. Однако, сравнение результатов моделирования климата и фактических данных измерений рядов глобальных температур атмосферного воздуха за период с 1870 г. до настоящего времени выявили заметные количественные и качественные расхождения (Покровский, 2010), что ставит под сомнения и другие выводы МГЭИК. Кроме того, в

ряде работ продемонстрирована прямая и опосредованная связь изменений солнечной активности и ряда земных климатических параметров (см., например, Gray et al., 2010; Покровский, 2010).

Главным “реципиентом” солнечной энергии на Земле является Мировой океан. Он же является основным “контейнером” для сохранения тепловой энергии на Земле. Тропическая зона океана получает большую часть приходящей энергии Солнца. Следовательно, климатические записи температуры поверхности океана (ТПО) в тропической зоне, вероятно, должны содержать “отклик” на изменения солнечной активности. Поэтому первая цель данной работы состояла в проверке этой гипотезы.

Далее полученная океаном лучистая энергия Солнца, преобразованная в тепловую, перераспределяется среди компонентов климатической системы, включающей атмосферу, биосферу и геосферу. При этом возникает ряд прямых и обратных связей, некоторые из которых моделировались участниками МГЭИК. Но результаты валидации с данными наблюдений во многих случаях оказывались неудовлетворительным и поэтому не предаются публичному обсуждению. Так, например, в работе (Покровский и др., 2001) было показано, что расхождения в значениях потоков приходящей КВ радиации (на поверхность Земли) между результатами моделирования, с одной стороны, и данными наземных и спутниковых измерений, с другой стороны, составляли десятки процентов. При этом надежность спутниковых оценок потоков приходящей радиации была удостоверена путем валидации относительно данных наблюдений наземной актинометрической сети (Покровский и др., 1999). Одна из причин, вероятно, состоит в недостаточно корректном учете облачности и трудностях ее параметризации в климатических моделях.

Эта проблема не решена до настоящего времени. Модели демонстрируют отсутствие межгодовой изменчивости глобальной облачности, что противоречит результатам спутниковых измерений, полученным в рамках проекта ISCCP (Покровский, 2019а). Модуляции наблюдаемого межгодового хода облачности согласуются с соответствующими изменениями глобальной температуры (Покровский, 2019а). В нашей следующей работе (Покровский, 2019б) на основе статистической обработки климатических рядов даны количественные оценки вклада нескольких компонентов климатической системы на изменения глобальной температуры, имеющие разные временные масштабы. Это обстоятельство создает предпосылки для начала объективного анализа прямых и обратных связей между блоками климатической системы. Подходящим инструментарием на первом этапе может оказаться вейвлет и кросс-вейвлет

анализ климатических рядов (Torrence, Compo, 1998). Первые результаты исследований представлены в настоящей работе.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

К настоящему времени сформированы проверенные и верифицированные ряды основных климатообразующих параметров за период, начиная с 1850 г. Они представлены на сайтах метеорологических служб США и Великобритании. Уточненные ряды глобальной температуры воздуха CRUTEM даны на сайте климатического центра MetOffice университета восточной Англии (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>) и описаны в работе (Brohan et al., 2006).

Солнечная активность, подчиняясь 11-летнему циклу, демонстрировала постепенное возрастание, начиная с окончания малого ледникового периода (минимума Маундера), но в последние три цикла изменила тенденцию. Бельгийский центр данных по солнечной активности (Royal Observatory of Belgium, Brussels) располагает массивом месячных значений за период, начиная с 1749 г. в виде чисел Вольфа. Эти данные размещены на сайте (<http://sidc.oma.be/silso/DATA/>). Результаты пересчета данных солнечной активности (числа Вольфа) в энергетические единицы представлены в работах (Lean et al., 1995; Lean et al., 1998). В (Lean, 2000) показана полная согласованность обоих видов данных в период их одновременного наличия, что обосновывает оправданность применения длинных рядов чисел Вольфа в климатических исследованиях.

Ряды значений ТПО в тропической зоне и соответствующие значения индексов Эль-Ниньо заимствованы из архива NOAA. Они основаны на массиве NOAA ERSSTv5. Архив локализован на сайте <http://mpimet.mpg.de/cdo>. Описание данных можно найти в работе (Huang et al., 2017). Наряду с американскими архивами ТПО рассматривались также и британские массивы данных (Rayner et al., 2007; Brohan et al., 2006), представленные на сайте <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst>. На этих же сайтах представлены ряды различных климатических океанических индексов для ТПО.

Остановимся на методике анализа климатических данных. В предыдущей работе (Покровский, 2010) был предложен метод сглаживания нестационарных рядов наблюдений, который позволил выявить согласованные медленные колебания основных климатических индексов, включая исключение линейных трендов (см., Kantelhardt et al., 2001). Для независимого подтверждения полученных результатов целесообразно применить спектральный метод анализа. Именно вейвлет

анализ позволяет оперировать с нестационарными рядами в отличие от классического Фурье анализа. Вейвлет анализ в науках о Земле предназначен для спектрального анализа как локальных (по временной координате), так и глобальных вариаций амплитуд климатических рядов (Torrence, Compo, 1998). После преобразования временных рядов в частотно-временную область данный метод позволяет выявить максимальные значения спектральных амплитуд, локализованные по временной оси, по годам, для определенных важнейших квазипериодичностей (квазичастот) климатических рядов. Формулы преобразования одномерного ряда в двумерный частотно-временной образ даны во многих работах (например, Torrence, Compo, 1998), а для климатических приложений также в (Покровский, 2010).

Два свойства вейвлетов определяют их преимущества по отношению к другим спектральным методам, например, Фурье анализу (Jenkins, Watts, 1968). Первое – любой вертикальный разрез двумерного вейвлет спектра пропорционален одномерному преобразованию Фурье для данного момента времени. Таким образом, вейвлет выявляет нестационарность климатических рядов в количественной форме. Второе – интервал детектируемых периодичностей получаемого спектра может в 4 раза превышать длину используемого временного ряда (Daubechies, 1990). В заключение этой части отметим, что нами используются вейвлеты с функцией преобразования Морли (Daubechies, 1990; Torrence, Compo, 1998).

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Логика изложения соответствует порядку возникновения прямых и обратных связей в климатической системе. Внешним входящим фактором является солнечная радиация. Затем рассмотрено влияние ее изменений на температуру океана и ее тропическую зону (Broecker, Peteet, Rind, 1985).

В предыдущей работе (Покровский, 2010) был применен метод выделения аномалий нестационарных климатических рядов на основе исключения, как линейного тренда, так и средних климатических значений (Jenkins, Watts, 1968). Этот прием является стандартным при анализе нестационарных случайных процессов в математической статистике и физических приложениях (Kantelhardt et al., 2001). Но в метеорологии, неявно предполагающей стационарность рядов (что опровергается самими метеорологами), обычно, аномалии вычисляются путем исключения только средних значений. Здесь же мы будем исключать оба параметра случайного процесса одновременно.

Солнечная активность

На рис. 1, *а* представлен ход изменений аномалий солнечной активности за весь период наблюдений с середины 18-го века (Прист, 1985). Хорошо видны 11-летние циклы. На нем также обнаруживаются три периода повышенных значений и два известных периода малых значений: в начале наблюдений в 18-го веке — минимум Далтона, и современный минимум, проявившийся в конце 19-го века и перешедший в максимум во второй половине 20-го века. При этом прослеживаются медленные квазипериодические колебания (модуляции) максимальных значений внутри каждого 11-летнего цикла. Число пятен и вспышек на Солнце плавно нарастает и падает каждые одиннадцать лет не только из-за каких-то внутренних процессов внутри светила, но и из-за гравитационных взаимодействий между его недрами, Землей, Венерой и Юпитером (Прист, 1985). Отметим, что последние три цикла характеризуются снижением солнечной активности.

Вейвлет анализ является инструментом для выявления скрытых периодичностей (рис. 1, *б*). На рис. 1, *б* можно отметить 2 аномальные зоны периодичностей. Первая, наиболее интенсивная зона, отвечающая 11-летнему циклу, прерывается только в интервал минимума Далтона. Вторая зона соответствует квази 60–80-летнему циклу естественных колебаний климата, о котором уже упоминалось ранее во многих работах, например, (Gleissberg, 1973), продолжается с минимума в конце 19-го и начале 20-го веков, когда снижалась солнечная активность. Это известный вековой цикл солнечной активности (“цикл Гляйсберга”) имеет длину около 70–100 лет (Gleissberg, 1973) и проявляется в модуляциях 11-летних циклов. Наряду с ним следует упомянуть и двухвековой цикл (“цикл Зюсса” или “цикл де Врие”, (Gleissberg, 1973)), в качестве минимумов которого можно рассматривать феномен, происходящий, примерно, раз в 200 лет, который незначительно представлен в вейвлет спектре.

Температура вод в тропической зоне Мирового океана

Предположительно ТПО в тропической зоне должна быть наиболее чувствительна к изменениям солнечной активности. Климатический ряд таких данных, основанный на инструментальных наблюдениях в тропической зоне океана (30° с.ш.—30° ю.ш.), представлен в виде аномалий на рис. 2, *а*, но только с середины 19-го века. Тем не менее, сопоставление с рис. 1, *а* дает удовлетворительное согласие. Модуляции межгодовых колебаний ТПО следуют за изменениями солнечной активности (рис. 1, *а*).

Анализ соответствующего вейвлет спектра (рис. 2, *б*) показывает, что аномалия 11-летнего солнечного цикла (транзитируется) переходит в “россыпь” нескольких аномалий, отвечающих периодичностям от 5 по 12 лет. Некоторые из них, выделенные красными замкнутыми линиями, являются 95%-статистически значимыми (Torgence and Compo, 1998). Кроме того, можно найти еще 3 зоны скрытых квазипериодичностей. Самая интенсивная зона 60–70 лет непосредственно перешла из солнечного спектра (рис. 1, *б*). Но две других зоны, отвечающих очень медленным колебаниям около 128 и 256 лет, вероятно, представляют собой реакцию океана, как осциллятора, на упомянутые выше внешние возмущения (вековые солнечные циклы).

За последние полвека основным источником данных о ТПО являются спутниковые данные дистанционного зондирования, обеспечивавшие глобальное покрытие с высоким пространственно-временным разрешением. В этой связи нами были выполнены расчеты вейвлет спектров для рядов ТПО за период с 1968 по 2018 г., когда уже использовались данные дистанционного зондирования. На рис. 2, *в* представлен такой спектр для климатического ряда ТПО в тропиках. Из этого графика следует, что, несмотря на уменьшение базового временного интервала почти в 2 раза, сохраняются почти все основные аномалии вейвлет спектра, включая 2 из 3 зон, выявленные на рис. 2, *б*. Отличие состоит в исключении наиболее долгопериодной компоненты из-за укорочения использованного временного ряда.

Необходимо отметить, что полученный результат вполне согласуется с ранее неоднократно упоминавшимся фундаментальным климатическим колебанием (ФКК) с периодом 60–80 лет (см., например, Zhang et al., 2008). Более того, теперь становится понятным, что его первопричиной является квазипериодическое колебание солнечной активности, которое трансформируется в соответствующее колебание температуры поверхности океана (ТПО). Очевидно, что обратное воздействие невозможно.

Важнейшим термодинамическим механизмом преобразования энергии в тропической зоне является феномен Эль-Ниньо (Thompson, Battisti, 2001), наблюдаемый в Тихом океане. Известно (Barnston et al., 2001), что это явление имеет квазипериодичность порядка 5–7 лет. Прогнозируемость этого феномена рассмотрена в ряде работ (см., например, Tippett, Barnston, 2008). Согласно теории известного океанолога Брокера (Broecker et al., 1985), именно у берегов Перу подводная глубинная ветвь глобального океанического конвейера, пройдя огромный путь через южный океан из северной и южной Атлантики, поднимается на поверхность у берегов Южной Америки, смешива-

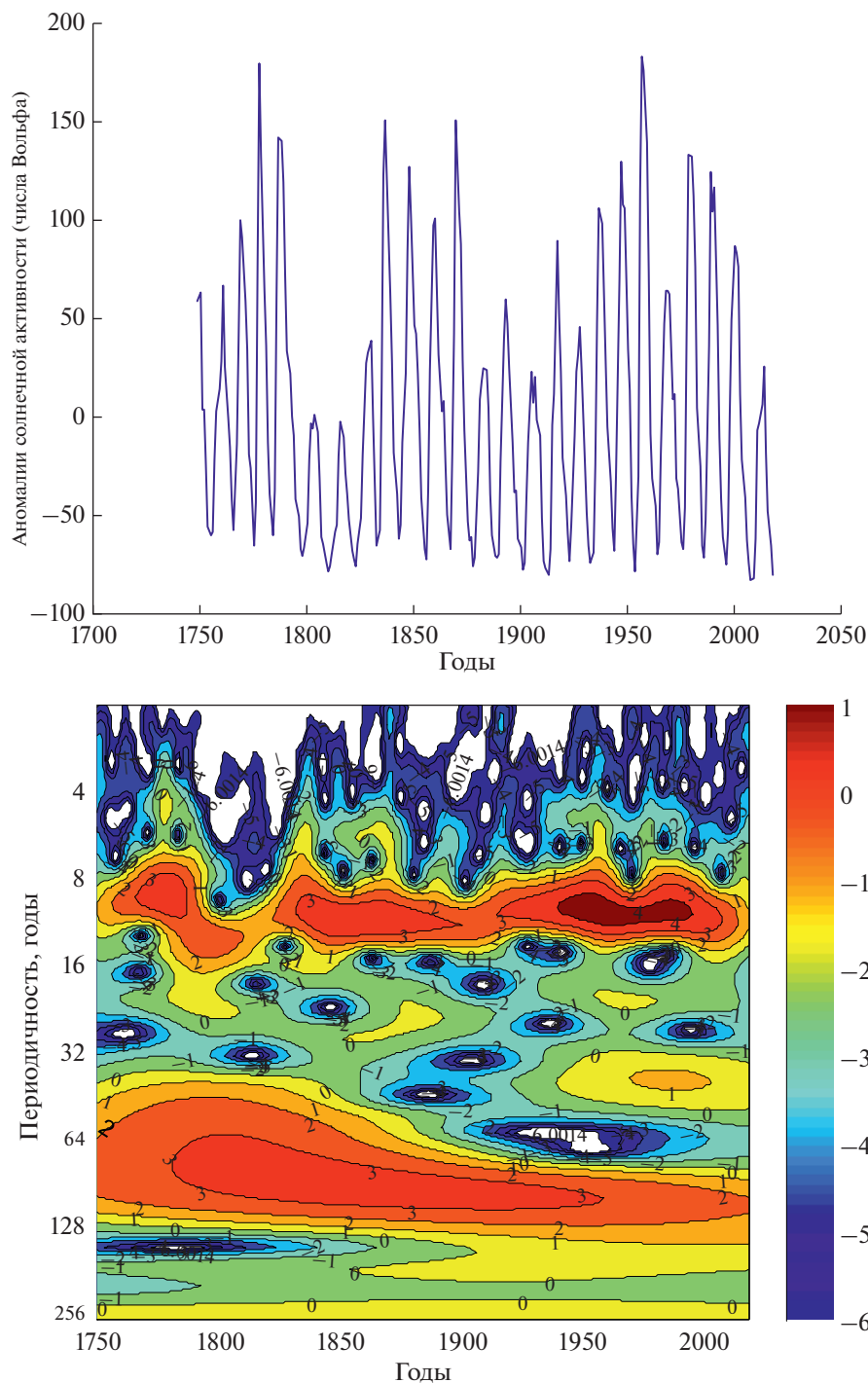


Рис. 1. Анализ климатического ряда аномалий значений солнечной активности (числа Вольфа): *a* – временной ряд аномалий годовых значений; *б* – вейвлет спектр.

ясь с несколькими поверхностными течениями. Поэтому представляет интерес изучение спектра соответствующих климатических рядов.

С феноменом Эль-Ниньо связано несколько климатических индексов 1, 2, 3 и 4 Niño, характеризующих средние значения ТПО в нескольких

регионах тропической зоны Тихого океана. Niño 1 + 2 (0° – 10° ю.ш., 90° з.д.– 80° з.д.): регион Niño 1 + 2 является самым маленьким и восточным среди регионов ТПО Niño и соответствует региону прибрежной Южной Америки, где Эль-Ниньо был впервые замечен местным населением. Niño 4 (5° с.ш.– 5° ю.ш., 160° в.д.– 150° з.д.): индекс Niño 4

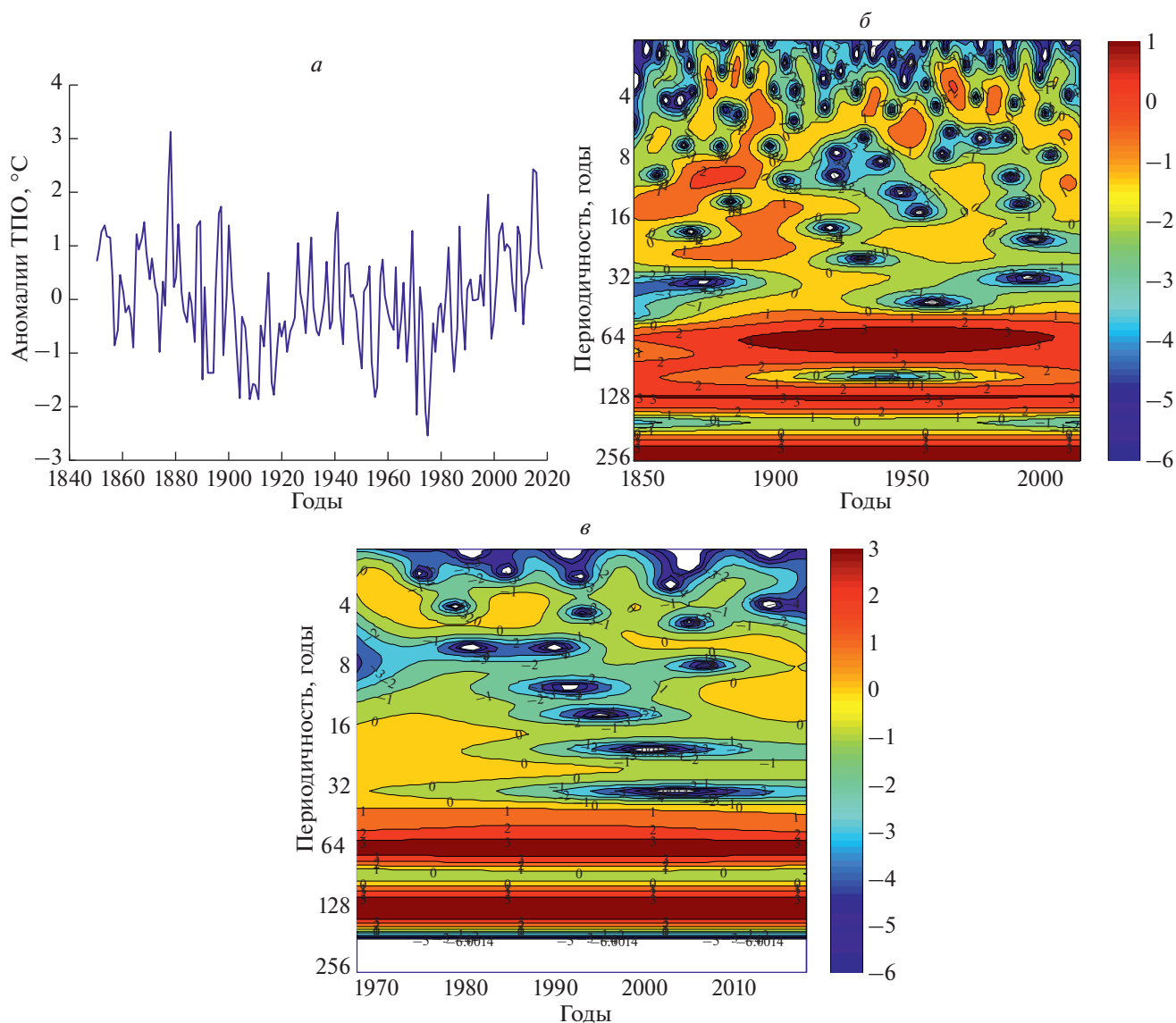


Рис. 2. Анализ климатического ряда аномалий значений ТПО в тропической зоне (°C): *а* – временной ряд аномалий годовых значений в интервале 1856–2018 гг. *б* – Вейвлет спектр ТПО в интервале 1856–2018 гг., *в* – вейвлет спектр ТПО в интервале 1968–2018 гг.

отражает аномалии SST в центральной экваториальной части Тихого океана. Этот регион имеет тенденцию иметь меньшую дисперсию, чем другие регионы Эль-Ниньо.

На рис. 3 представлен анализ спектра для климатического ряда индекса Niño 1,2. Этот индекс описывает пространственный контраст значений ТПО в зоне, прилегающей к берегам Перу, где происходит смешивание вод нескольких течений. Сам временной ряд этого индекса Эль-Ниньо не несет информации о долгопериодных колебаниях, кроме короткопериодных 5–11-летних. Согласно данным двух последних вейвлет спектров показывает, что, именно, феномен Эль-Ниньо в некоторой мере определяет временную зависи-

мость ТПО во всей тропической зоне океана, но прежде всего для ФКК и вековых колебаний. Индикатор Niño 4 температурного контраста вод в центральной части тропиков Тихого океана при вейвлет анализе также демонстрирует сходство с аналогичным спектром ТПО для всей тропической зоны (рис. 2, б), чем Niño 1,2.

Как и следовало ожидать, структура колебаний (межгодовой) изменчивости температуры поверхности океана в тропиках в значительной мере повторяет особенности модуляций солнечной активности. При этом наиболее очевиден переход и сохранение фундаментального климатического колебания, а также вековых колебаний. Возникает естественный вопрос о возможности распро-

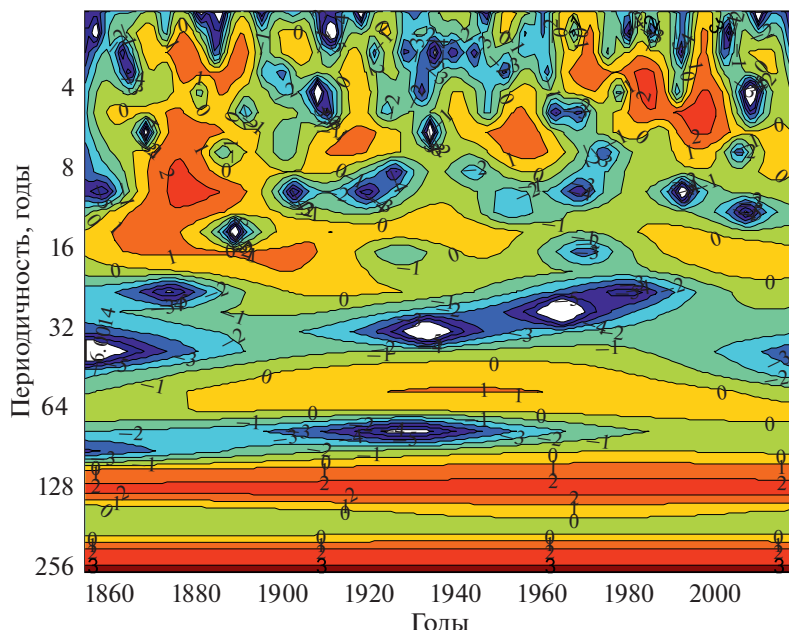


Рис. 3. Вейвлет анализ климатического ряда аномалий значений индекса Niño1,2.

странения этого климатического механизма на внетропические широты.

Влияние на ТПО во внетропических широтах Тихого океана

Из зоны Эль-Ниньо тропические воды распространяются на север, юг и запад. Влияние ТПО в тропической зоне на внетропические широты обсуждалось в ряде работ (например, Noerling, Hurrell, Xu, 2001). Пока остановимся только на северном направлении, определяемом течением Куро-Сию. Сочетание нескольких разнонаправленных течений в северной части Тихого океана образует пространственную аномалию ТПО, для которой был введен специальный климатический индекс Тихоокеанское декадное колебание (ТДК, в оригинале PDO — Pacific Decadal Oscillation). Индекс Тихоокеанского десятилетнего колебания (PDO) связан с ведущей эмпирической ортогональной функцией (EOF) месячных аномалий температур поверхности северной части Тихого океана (к полюсу от 20° N) и характеризует знак аномалии ТПО в центре бассейна Тихого океана с временным масштабом от нескольких лет до нескольких десятилетий. Во время “теплой” или “положительной” фазы ТДК западная часть Тихого океана становится прохладнее, а восточная часть океана нагревается. Во время “холодной” или “отрицательной” фазы возникает противоположная картина. Роль ТДК в формировании атмосферной циркуляции на территории Азии и, вторично, Северной Америки описана в (Mantua et al., 1997; Trenberth, Hurrell, 1994).

Вейвлет спектр ТДК демонстрирует уже знакомые аномальные зоны периодичностей, связанных с 11-летним циклом и ФКК солнечной активности. Внутrideкадные климатические колебания, выявленные вейвлет анализом, отмечались ранее косвенным образом в (Mantua et al., 1997).

Тихоокеанско-североамериканский (ТСА) климатический индекс (в оригинале — PNA) описывает крупномасштабную модель погоды с положительными и отрицательными модами, которые связывают картину атмосферной циркуляции над северной частью Тихого океана с аномалиями над североамериканским континентом. Таким образом, индекс ТСА описывает медленные климатические колебания в Северной Америке, оказывая влияние на ее восточное побережье (Barnston, Livezey, 1987). Вейвлет спектр ТСА (рис. 4) демонстрирует уже знакомые аномальные зоны периодичностей, связанных с 11-летним циклом и специфическим ФКК солнечной активности, имеющим вековую квазипериодичность около 120 лет. При этом, декадная квазипериодичность демонстрирует статистическую значимость 95%.

Таким образом, выраженные медленные колебания климата в Азии происходят в 2 раза быстрее, чем на востоке Северной Америки. Это отмечается американскими климатологами, которых глобальное потепление волнует в меньшей степени (Spencer et al., 2007).

Отметим, что во многих работах представлены результаты исследований по оценке влияния PDO и других климатических индексов на изменения климата в Восточной Азии и Северной Америке.

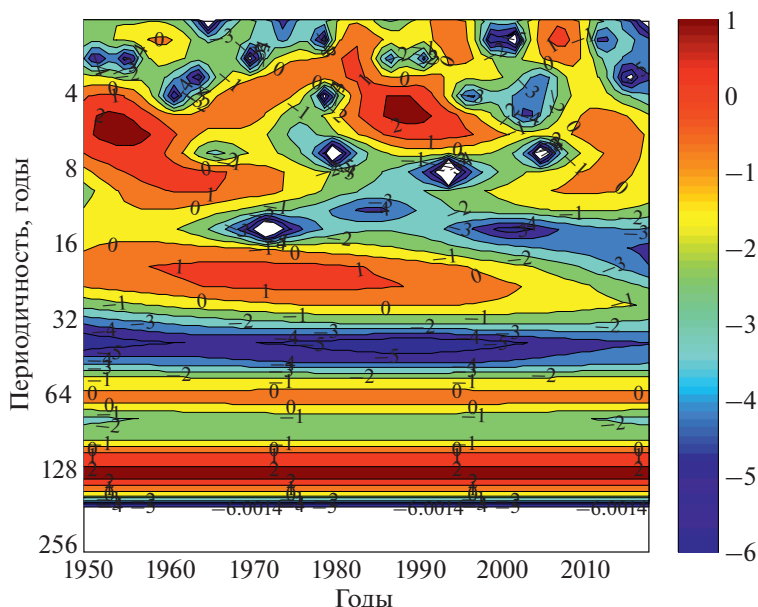


Рис. 4. Вейвлет анализ климатического ряда аномалий значений тихоокеанского индекса PNA.

ки. Например, в работе (Tan et al., 2011) изучено влияние на изменение осадков в Канаде.

Представленные в этом разделе результаты анализа определяют роль изменений солнечной активности в колебаниях ТПО в зоне основных океанических течений в акватории Тихого океана.

Перераспределение тепловой энергии в Северной Атлантике

Глобальные океанические течения, входящие в структуру глобального конвейера Брокера (Broecker, Peteet, Rind, 1985), осуществляют перераспределение тепловой энергии, полученной от Солнца, из тропиков в умеренные и высокие широты (Hoerling, Hurrell, Xu, 2001). Северная Атлантика пересекается несколькими течениями, и возникшие аномалии ТПО критически влияют на режимы атмосферной циркуляции над территорией Евразии (крупнейшего материка), а следовательно и на глобальный климат (Sutton, Hodson, 2005). Эти течения, прежде всего Гольфстрим и Лабрадорское течение, определяют различие на одинаковых широтах в климатических условиях на европейском и североамериканском берегах Атлантики. Известный климатический индекс АМО (Атлантическое мультитекадное колебание) представляет значения ТПО, осредненные для территории Атлантики к северу от тропической зоны (Enfield, Mestas-Nunez, Trimble, 2001). Таким образом, АМО представляет собой интегральный показатель, характеризующий тепловую энергию Северной Атлантики (Hurrell, 1995).

График временного ряда АМО (рис. 5, а) демонстрирует квазипериодические колебания, сходные с аналогичными рядами солнечной активности и ТПО в тропиках. Модуляции АМО имеют квазипериодичность 60–70 лет. Поэтому неудивительно, что вейвлет спектр для АМО (рис. 5, б) позволяет выявить соответствующий диапазон периодичностей. Отметим, что при этом ФКК для 60–70-летнего интервала демонстрирует 95%-ную статистическую значимость.

Важным результатом этого раздела оказалось то, что солнечная активность проявилась в климатических колебаниях ТПО в зоне основных океанических течений в Северной Атлантике, удаленной от региона формирования феномена Эль-Ниньо. Это обстоятельство свидетельствует в пользу теории глобального океанического конвейера Брокера.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вопросам влияния изменений солнечной активности на колебания земного климата посвящены многочисленные исследования. Некоторые из зарубежных работ упомянуты во введении. Следует отметить отечественные исследования, которые покрывают весь спектр исследований солнечно-земных связей. Различные аспекты изучения цикличности солнечной активности представлены в следующих работах: (Вигинский, 1973; Наговицын, 1997; Огурцов, 2005). Влиянию солнечной активности на климат посвящена наиболее многочисленная группа работ: (Авакян, Воронин, 2006; Kondratyev, 1999; Распопов и др.,

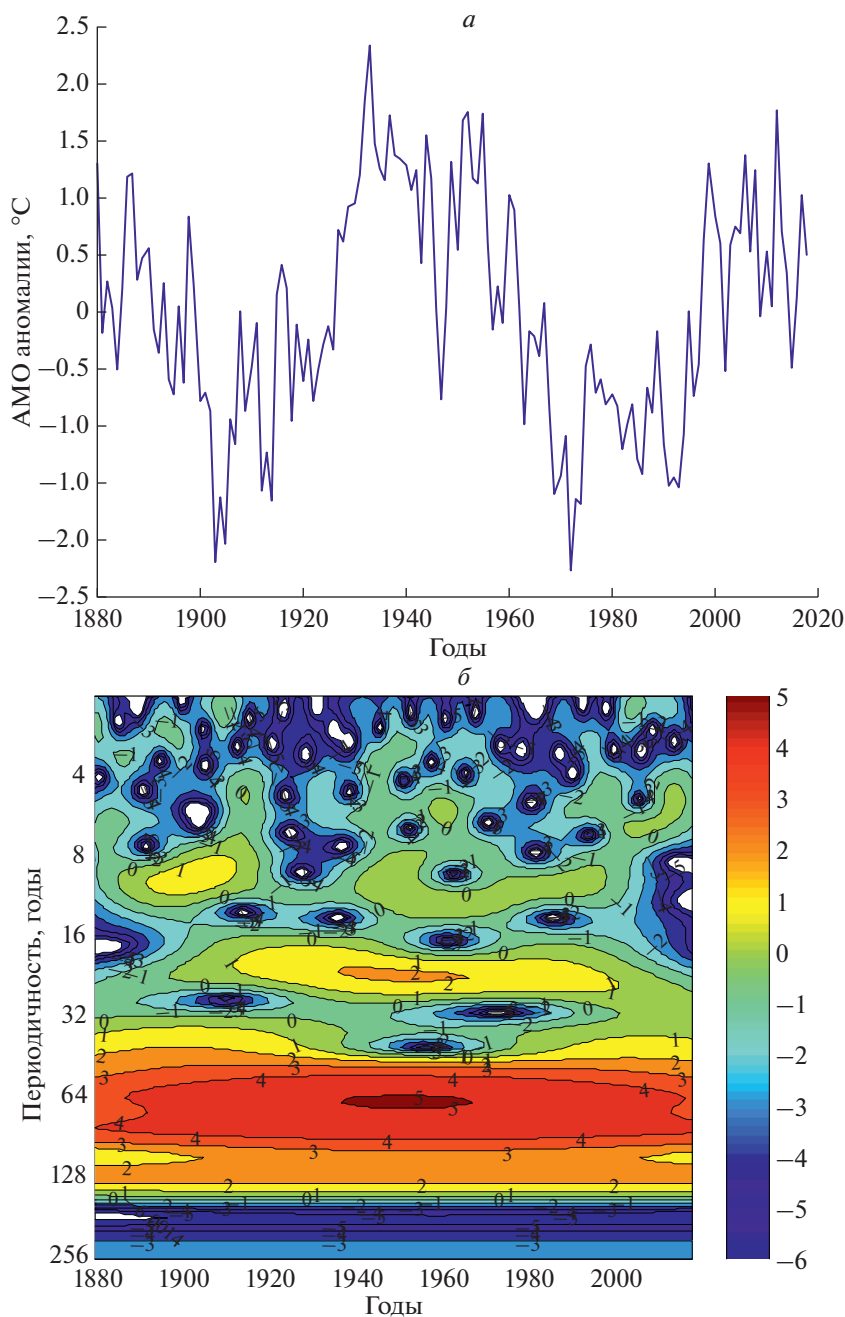


Рис. 5. Анализ климатического ряда аномалий значений североатлантического индекса АМО (°C): *a* – временной ряд аномалий годовых значений; *б* – вейвлет спектр.

2001; Шумилов и др., 2000; Хромов, 1973; Чижевский, 1973). Роль космических лучей в формировании облачности рассмотрена в отечественных статьях (Веретенко, Пудовкина, 1994; Кудрявцева, Юнгнер, 2005; Pudovkin, Veretenko, 1995). Все эти работы выполнены специалистами в области солнечной физики при ограниченной компетентности в области собственно климатологии. Поэтому результаты носят эмпирический характер и

ограничивают строгость полученных выводов. Отметим, что вопросу влияния солнечной активности на климат посвящено много работ, в которых получен отрицательный ответ. Отметим, например работу (Stauning, 2011).

Начиная с 80-х годов, многие зарубежные климатологи благодаря доступности баз метеорологических и климатологических данных по атмосфере и океану заметили не только изменение

тренда глобальной температуры атмосферы и океана в 1976–1977 годах, но также и резкое изменение характера атмосферной циркуляции, получившее наименование “radical shift” (Bond et al., 2003; Mantua et al., 1997; Miller et al., 1994; Swanson, Tsonis, 2009; Yasunaka, Hanawa, 2002; Zhang et al., 2008). При этом никто из упомянутых исследователей не связывал указанный “климатический сдвиг” с модуляциями солнечной активности.

Следует отметить, что изображения спектров более коротких рядов АМО и PDO в работе (Tang et al., 2014) демонстрируют сходные черты с представленными нами выше. Это обстоятельство повышает достоверность полученных нами результатов. Но эти авторы также не связывают их с колебаниями солнечной активности.

В работе (McLean et al., 2009) продемонстрировано влияние Эль-Ниньо на среднюю глобальную температуру тропосферы. Ранее климатическая роль “больших” событий Эль-Ниньо обсуждена в работе (Trenberth, Hurrell, 1994). Прогноз событий Эль-Ниньо рассмотрен в работах (Barnston et al., 2012; Thompson et al., 2000; Thompson, Battisti, 2001; Tippet, Barnston, 2008). Интенсивное Эль-Ниньо 1998 г. “поставило точку” на активной фазе современного потепления, перешедшего в “климатическую паузу” в начале 21-го века.

Основная новизна данной работы в увязывании медленных климатических колебаний солнечной активности с соответствующими изменениями в температуре поверхности океана в тропических и внетропических широтах на основе адекватного метода спектрального вейвлет — анализа временных рядов.

Этот подход позволил проследить транзит модуляций медленных колебаний солнечной активности в соответствующие осцилляции температуры поверхностного слоя океана не только в тропической зоне, но и в областях активных океанических течений в умеренных и высоких широтах. Мы назвали этот “внешний сигнал” фундаментальным климатическим колебанием. Оказывается, что упомянутый транзит “климатического сигнала”, идущего от Солнца, распространяется и на другие компоненты климатической системы (атмосфера и криосфера). Соответствующие результаты будут представлены в последующей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авакян С.В., Воронин Н.А. О возможном физическом механизме воздействия солнечной и геомагнитной активности на явления в нижней атмосфере // Исслед. Земли из космоса 2006. № 2. С. 28–33.

Веретенко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты форбуш-понижений галактических космических лучей в вариациях общей облачности // Геомагнетизм и Аэрномия. 1994. Т. 34. № 4. С. 38–44.

Вигинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. JL: Наука, 1973. 275 с.

Кудрявцев И.В., Юнгнер Х. К вопросу о возможном механизме влияния космических лучей на формирование облачности на малых высотах // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45. № 5. С. 682–689.

Наговицын Ю.А. Нелинейная математическая модель солнечной цикличности и возможности для реконструкции активности в прошлом // Письма в Астрон. журн. 1997. Т. 23. № 11–12. С. 859–862.

Огуцов М.Г. Современные достижения солнечной палеоастрофизики и проблемы долговременного прогноза активности Солнца // Астрон. журн. 2005. Т. 82. № 6. С. 555–560.

Покровский О.М., Далюк И.В., Махоткина Е.Л. Сравнительный анализ наземных и спутниковых измерений суммарной солнечной радиации у поверхности Земли для территории России // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 4. С. 3–13.

Покровский О.М., Далюк И.В., Махоткина Е.Л. Об использовании данных актинометрических наблюдений для оценки достоверности радиационного блока глобальной модели общей циркуляции атмосферы на территории России // Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 5–17.

Покровский О.М. Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исслед. Земли из космоса, 2010. № 5. С. 11–24.

Покровский О.М. Изменение облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 3–13.

Покровский О.М. Количественные оценки влияния важнейших факторов на изменение глобального климата в последние 150 лет // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 3–13.

Прист Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985. С. 413. 592 с.

Распопов О.М. и др. Нелинейный характер воздействия солнечной активности на атмосферу и окружающую среду // Геомагнетизм и Аэрномия. 2001. Т. 41. № 3. С. 58–63.

Шумилов О.И. и др. Оценка климатического отклика на вариации солнечной и вулканической активности // Геомагнетизм и Аэрномия. 2000. Т. 40. № 6. С. 9–13.

Хромов С.П. О некоторых спорных вопросах, относящихся к цикличности солнечной активности и ее предполагаемым связям с климатом // Метеорология и Гидрология. 1973. № 9. С. 93–98.

Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973. 349 с.

Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. V. 115. P. 1083–1126.

- Barnston A.G., Tippet M.K., L'Heureux M.L., Li S., DeWitt D.G.* Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002–11: Is our capability increasing? // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. V. 93. № 5. P. 631–651.
- Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., Stabeno P.* Recent shifts in the state of the North Pacific // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. P. 2183.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018597>
- Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D.* Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // *Nature*. 1985. V. 315. P. 21–26.
- Brohan, P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D.* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. D12106.
<https://doi.org/10.1029/2005JD006548>
- Daubechies I.* The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis // *IEEE Trans. Inform. Theory*. 1990. V. 36. P. 961–1004.
- Dickson R.R., Meincke J., Malberg S.A., Lee A.J.* The “great salinity anomaly” in the northern North Atlantic 1968–1982 // *Prog. Oceanogr.* 1988. V. 20. P. 103–151.
[https://doi.org/10.1016/0079-6611\(88\)90049](https://doi.org/10.1016/0079-6611(88)90049)
- Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J.* The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophysical Research Letters*, 2001. V. 28. P. 2077–2080.
- Gleissberg W.* Revision of the probability laws of sunspot variations. Frankfurt (M.): Astronom. Inst., 1973. 246 p.
- Gray L.J. et al.* Solar influences on climate // *Rev. Geophys.* 2010. V. 48. P. RG4001.
<https://doi.org/10.1029/2009RG000282>
- Hoerling M.P., Hurrell J.W., Xu T.* Tropical origin for recent North Atlantic climate change // *Science*. 2001. V. 292. P. 90–92.
<https://doi.org/10.1126/science.1058582>
- Huang et al.* Extended Reconstructed Sea Surface Temperatures Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and Inter-comparisons // *J. Climate*. 2017. V. 30 (20). P. 8179–8205.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0836.1>
- Hurrell J.W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation // *Science*. 1995. V. 269. P. 676–679.
<https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>
- Kantelhardt J.W., Koscielny-Bunde E., Rego H.A., Havlin S., Bunde A.* Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2001. V. 295(3–4). P. 441–454.
- Kondratyev K. Ya.* Climatic Effects of Aerosols and Clouds, Springer Praxis Books, 1999. 264 p.
- Lean J., Rind D.* Climate forcing by changing solar radiation // *J. Climate* 1998. V. 11. P. 3069–3094.
- Lean J.* Evolution of the Sun's Spectral Irradiance Since the Maunder Minimum // *Geophysical Research Letters*. 2000. V. 27. № 16. P. 2425–2428.
- McLean J.D., de Freitas C.R., Carter R.M.* Influence of the Southern Oscillation on tropospheric temperature // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. P. D14104.
<https://doi.org/10.1029/2008JD011637>
- Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C.* A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // *Bulletin of the American Meteorological Society* 1997. V. 78. P. 1069–1079.
- Miller A., Cayan D., Barnett T., Graham N., Oberhuber J.* The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean // *Oceanography*. 1994. V. 7. P. 21–26.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V.* Long-Term Ice Variability in Arctic Marginal Seas // *J. Climate*. 2003. V. 16. P. 2068–2075.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 108. № D14. P. 4407.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Stauning P.* Solar activity—climate relations: A different approach // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. V. 73(13). P. 1999–2012.
- Sutton R.T., Hodson D.L.R.* Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate // *Science*. 2005. V. 309. P. 115–118.
- Swanson K.L., Tsonis A.A.* Has the climate recently shifted? // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L06711.
<https://doi.org/10.1029/2008GL037022>
- Tan X., Gan T.Y., Shao D.* Wavelet analysis of precipitation extremes over Canadian ecoregions and teleconnections to large-scale climate anomalies // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2016. V. 121(24) P. 14-469–14-478.
- Thompson C.J., Battisti D.S.* A linear stochastic dynamical model of ENSO. Part II: Analysis // *Journal of Climate*, 2001. V. 14(4). P. 445–466.
- Tippet M.K., Barnston A.G.* Skill of multimodel ENSO probability forecasts // *Monthly Weather Review*. 2008. V. 136(10). P. 3933–3946.
- Torrence C., Compo G.* A practical guide to wavelet analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. V. 79. P. 61–78.
- Trenberth K.E., Hurrell J.W.* Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific // *Climate Dynamics*. 1994. V. 9. P. 303–319.
- Yasunaka S., Hanawa K.* Regime shifts found in the Northern Hemisphere SST field // *J. Met. Soc. Jap.* 2002. V. 80. P. 119–135.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.80.119>
- Wallace J.M., Gutzler D.S.* Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter // *Mon. Wea. Rev.* 1981. V. 109. P. 784–812.
- Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L22701.
<https://doi.org/10.1029/2008GL035607>

Identification of a Fundamental Climatic Oscillations Using Wavelet Analysis of the Combined Data of Ground and Satellite Observations

O. M. Pokrovsky¹ and I. O. Pokrovsky¹

¹*Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia*

The slow climatic fluctuations in the sea surface temperature (SST) anomalies of the oceans in the Northern Hemisphere over the past 160 years as a response to the modulation of solar activity are revealed and investigated. Given the non-stationary nature of the climate series, the most appropriate method of analysis is the calculation of wavelet power spectra. It is shown that the maxima of 11-year solar cycles are subject to long-term modulation with a wide range of quasi-periodicity, in which there are: the interval of 60–80 years, as well as secular and two-century oscillations. These fluctuations are translated into the corresponding SST oscillations in the tropical zone. In the El Niño indices: Niño 1,2 and Niño 4, responsible for SST anomalies in the water area near the coast of South America and in the central part of Pacific tropics, there is a different emphasis on the mentioned long-term modulation. It can be assumed that 11-year fluctuations in solar activity are translated into short-period quasi-periodic (5–11 years) El Niño oscillations. In turn, long-term modulations, which we call, following previous researchers, the fundamental climatic oscillation (FCO), pass into SST oscillations in the Pacific and Atlantic Oceans, preserving the quasi-periodicity given by fluctuations in solar activity. In turn the FCO is repeated in a series of the following climate indices: Pacific Decadal (PDO) and Pacific North American (PNA) oscillations in the Pacific Ocean, as well as in the multi-decadal Atlantic oscillation (AMO). The positive phase of AMO that began in the mid-70s intensified the greenhouse effect on climate warming in the last quarter of the 20th century, but the stabilization of AMO values in the early 21st century led to a known “climate pause” in warming. It is shown that for the shortened climate series over the past half century, when the role of satellite measurements was dominant in the estimates of TPO anomalies and the considered indices of the world ocean, similar results were obtained for all wavelet spectra.

Keywords: climatic fluctuations, wavelet analysis, solar activity, sea surface temperature, series of oceanic climate indices Niño 1,2, Niño 4, PDO, PNA, AMO

REFERENCES

- Avakyan S.V., Voronin N.A.* O vozmozhnom fizicheskom mekhanizme vozdeystviya solnechnoy i geomagnitnoy aktivnosti na yavleniya v nizhney atmosfere. [On the possible physical mechanism of the influence of solar and geomagnetic activity on phenomena in the lower atmosphere] // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa* 2006. № 2. P. 28–33 (In Russian).
- Barnston A.G., Livezey R.E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Wea. Rev.* V. 115. P. 1083–1126.
- Barnston A.G., Tippet M.K., L'Heureux M.L., Li S., DeWitt D.G.* Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002–11: Is our capability increasing? // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. V. 93. № 5. P. 631–651.
- Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., Stabeno P.* Recent shifts in the state of the North Pacific // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. P. 2183. DOI: 10.1029/2003GL018597
- Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D.* Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // *Nature*. 1985. V. 315. P. 21–26.
- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D.* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D12106. DOI:10.1029/2005JD006548
- Chizhevsky A.L.* Zemnoe eho solnechnykh bur [Earthly echo of solar storms]. M. Myisl.: 1973, 349 p. (In Russian).
- Daubechies I.* The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis // *IEEE Trans. Inform. Theory*. 1990. V. 36. P. 961–1004.
- Dickson R.R., Meincke J., Malberg S.A., Lee A.J.* The “great salinity anomaly” in the northern North Atlantic 1968–1982 // *Prog. Oceanogr.* 1988. V. 20. P. 103–151. DOI: 10.1016/0079-6611(88)90049
- Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., P.J. Trimble.* The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 2077–2080.
- Gleissberg W.* Revision of the probability laws of sunspot variations. Frankfurt (M.): Astronom. Inst., 1973. 246 p.
- Gray L.J. et al.* Solar influences on climate // *Rev. Geophys.* 2010. V. 48. P. RG4001. DOI: 10.1029/2009RG000282
- Hoerling M.P., Hurrell J.W., Xu T.* Tropical origin for recent North Atlantic climate change // *Science*. 2001. V. 292. P. 90–92. DOI: 10.1126/science.1058582
- Huang et al.* Extended Reconstructed Sea Surface Temperatures Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and Intercomparisons // *J. Climate*. 2017. V. 30(20). P. 8179–8205. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1
- Hurrell J.W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation // *Science*. 1995. V. 269. P. 676–679. DOI: 10.1126/science.269.5224.676
- Khromov S.P.* O nekotorykh spornykh voprosakh, otnosyashchisya k tsiklichnosti solnechnoy aktivnosti i ee predpolagaemyim svyazyam s klimatom [On some controversial

- issues related to the cyclical nature of solar activity and its alleged relationship with the climate] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1973. № 9. P. 93 (In Russian).
- Kantelhardt J.W., Koscielny-Bunde E., Rego H.A., Havlin S., Bunde A.* Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2001. V. 295(3–4). P. 441–454.
- Kondratyev K.Ya.* Climatic Effects of Aerosols and Clouds, Springer Praxis Books, 1999. 264 p.
- Kudryavtsev I.V., Jungner X.* K voprosu o vozmozhnom mehanizme vliyaniya kosmicheskikh luchey na formirovanie oblachnosti na mal'nykh vyisotah // [On the possible mechanism of the influence of cosmic rays on the formation of clouds at low altitudes] // *Geomagnetism i aeronomiya*. 2005. V. 45. № 5. P. 682–689. 45. № 5. P. 682–689 (In Russian).
- Lean J., Rind D.* Climate forcing by changing solar radiation // *J. Climate* 1998. V. 11. P. 3069–3094.
- Lean J.* Evolution of the Sun's Spectral Irradiance Since the Maunder Minimum // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 16. P. 2425–2428.
- McLean J.D., de Freitas C.R., Carter R. M.* Influence of the Southern Oscillation on tropospheric temperature // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. D14104. DOI: 10.1029/2008JD011637
- Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C.* A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997. V. 78. P. 1069–1079.
- Miller A., Cayan D., Barnett T., Graham N., Oberhuber J.* The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean // *Oceanography*. 1994. V. 7. P. 21–26.
- Nagovitsyn Yu.A.* Nelineynaya matematicheskaya model solnechnoy tsiklichnosti i vozmozhnosti dlya rekonstruktsii aktivnosti v proshlom [A non-linear mathematical model of solar cyclicity and the possibility of reconstructing activity in the past] // *Pisma v Astron. Zhurn.* 1997. V. 23. № 11–12. P. 859–862 (In Russian).
- Ogurtsov M.G.* Sovremennyye dostizheniya solnechnoy paleoastrofiziki i problemyi dolgovremennogo prognoza aktivnosti Solntsa [Modern achievements of solar paleoastrophysics and the problems of long-term forecast of solar activity] // *Astron. Zhurn.* 2005. V. 82. № 6. P. 555–560 (In Russian).
- Pokrovsky O.M., Dalyuk I.V., Mahotkina E.L.* Sravnitel'nyy analiz nazemnykh i sputnikovyykh izmereniy summarnoy solnechnoy radiatsii u poverhnosti Zemli dlya territorii Rossii [Comparative analysis of ground-based and satellite measurements of total solar radiation at the Earth's surface for the territory of Russia] // *Issled. Zemli iz Kosmosa*. 1999. № 4. P. 3–13 (In Russian).
- Pokrovsky O.M., Dalyuk I.V., Mahotkina E.L.* Ob ispol'zovanii dannykh aktinometricheskikh nablyudeniy dlya otsenki dostovernosti radiatsionnogo bloka globalnoy modeli obshchey tsirkulyatsii atmosferyi na territorii Rossii [On the use of actinometric observations to assess the reliability of the radiation unit of the global model of general atmospheric circulation in Russia] // *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2001. № 8. P. 5–17 (In Russian).
- Pokrovsky O.M.*, Analiz faktorov izmeneniya klimata po dannym distantsionnykh i kontaktnykh izmereniy [Analysis of climate change factors according to distance and contact measurements] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2010. № 5. P. 11–24 (In Russian).
- Pokrovsky O.M.* Izmenenie oblachnosti v period globalnogo potepeniya po rezul'tatam mezhdunarodnogo sputnikovogo proekta [Cloud change during global warming following an international satellite project] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2009. № 1. P. 3–13.
- Pokrovsky O.M.* Kolichestvennyye otsenki vliyaniya vazhneyshikh faktorov na izmenenie globalnogo klimata v poslednie 150 let [Quantitative estimates of the impact of critical factors on global climate change over the past 150 years] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2009. № 3. P. 3–13 (In Russian).
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V.* Long-Term Ice Variability in Arctic Marginal Seas // *J. Climate*. 2003. V. 16. P. 2068–2075.
- Priest E.R.* Solnechnaya magnitogidrodinamika [Solar magnetohydrodynamics] M.: Mir, 1985. P. 413 (In Russian).
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 108. № D14. P. 4407. DOI: 10.1029/2002JD002670
- Raspopov O.M. et al.* Nelineynyy harakter vozdeystviya solnechnoy aktivnosti na atmosferu i okruzhayushchuyu sredu [Non-linear nature of the impact of solar activity on the atmosphere and the environment] // *Geomagnetizm i Aeronomiya*. 2001. V. 41. № 3. P. 58–63 (In Russian).
- Shumilov O.I. et al.* Otsenka klimaticheskogo otklika na variatsii solnechnoy i vulkanicheskoy aktivnosti [Assessment of the climatic response to variations in solar and volcanic activity] // *Geomagnetizm i Aeronomiya*. 2000. T. 40. № 6. P. 9–13.
- Stauning P.* Solar activity–climate relations: A different approach. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. V. 73(13). P. 1999–2012.
- Sutton R.T., Hodson D.L.R.* Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate // *Science*. 2005. V. 309. P. 115–118.
- Swanson K.L., Tsonis A.A.* Has the climate recently shifted? // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L06711. DOI: 10.1029/2008GL037022
- Tan X., Gan T.Y., Shao D.* Wavelet analysis of precipitation extremes over Canadian ecoregions and teleconnections to large-scale climate anomalies // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2016. V. 121(24). P. 14–469–14–478.
- Thompson C.J., Battisti D.S.* A linear stochastic dynamical model of ENSO. Part II: Analysis // *J. Climate*. 2001. V. 14(4). P. 445–466.
- Tippett M.K., Barnston A.G.* Skill of multimodel ENSO probability forecasts // *Monthly Weather Review*. 2008. V. 136(10). P. 3933–3946.

- Torrence C., Compo G.* A practical guide to wavelet analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. V. 79. P. 61–78.
- Trenberth K.E., Hurrell J.W.* Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific // Climate Dynamics. 1994. V. 9. P. 303–319.
- Yasunaka S., Hanawa K.* Regime shifts found in the Northern Hemisphere SST field // J. Met. Soc. Jap. 2002. V. 80. P. 119–135. DOI: 10.2151/jmsj.80.119
- Veretenenko S.B., Pudovkin M.I.* Effektyi forbush-ponizheniy galakticheskikh kosmicheskikh luchey v variatsiyah obschey oblachnosti [Effects of Forbush decreases of galactic cosmic rays in variations of total cloud cover] // Geomagnetism i Aeronomiya. 1994. T. 34. № 4. P. 38–44 (In Russian).
- Viginsky Yu.I.* Tsiklichnost i prognozyi solnechnoy aktivnosti [Cyclicality and forecasts of solar activity]. L: Nauka. 1973. 275 p. (in Russian)
- Wallace J.M., Gutzler D.S.* Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter // Mon. Wea. Rev. 1981. V. 109. P. 784–812.
- Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. P. L22701. DOI: 10.1029/2008GL035607