——— ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ **—**——

УДК 551.5 + 551.51

ВЕЙВЛЕТ И КРОСС-ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗ СУММ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2017 г. Денис Ю. Васильев¹, Олег К. Бабков¹, Екатерина С. Кочеткова², Владимир А. Семенов^{3,4}

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия ²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия ³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия ⁴Институт географии РАН, Москва, Россия e-mail: vasilevdy@ugatu.su

Поступила в редакцию 24.10.2014 г.

Аннотация. С целью выявления периодичностей в данных станционных метеорологических наблюдений проведен вейвлет анализ временных рядов приповерхностной температуры воздуха и сумм атмосферных осадков в некоторых городах Европейской территории России, с оценкой статистической значимости полученных результатов. Метод кросс-вейвлет анализа использовался для установления связи между колебаниями рядов температуры и атмосферных осадков с важными климатическими индексами, такими как Североатлантическое колебание (САК), Атлантическое мультидекадное колебание (АМК) и Арктическая осцилляция (АО). Выявлен ряд значимых циклов в различных частотных диапазонах. Кросс-вейвлет анализ САК, АО с осадками и температурными рядами показал более высокую тесноту связей, по сравнению с АМК. В целом установлена высокая связь высокочастотоных колебаний осадков и температур исследуемого района с флуктуациями САК, АМК и АО, что может определяться не только самими этими климатическими индексами, но и связью этих атлантических флуктуаций с явлением Эль-Ниньо. Среднечастотные колебания метеоданных района с периодами 7–11 лет возможно являются свидетельством связи с флуктуацией САК. Установленная когерентность индекса АМК и данных наблюдений локализуется на временных интервалах до и после 1970 г., что согласуется с квазициклическими изменениями климата Земли.

Ключевые слова: вейвлет анализ, кросс-вейвлет анализ, среднегодовая температура воздуха, годовая сумма атмосферных осадков, климатические индексы, корреляционные связи.

DOI: 10.7868/S0373244417060068

WAVELET AND CROSS-WAVELET ANALYSIS OF THE SUMS OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION AND SURFACE AIR TEMPERATURE IN EUROPEAN RUSSIA

Denis Yu. Vasil'ev¹, Oleg K. Babkov¹, Ekaterina S. Kochetkova², and Vladimir A. Semenov^{3, 4}

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia ²Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia ³Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ⁴Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia e-mail: vasilevdy@ugatu.su

Received October 24, 2014

Abstract. Wavelet analysis of time series of surface air temperature and sums of precipitation in some cities of European Russia, with an estimate of the statistical significance of the obtained results is carried out with the purpose of identifying periodicities in the data of station meteorological observations. A cross-wavelet analysis was used to establish a link between variations in series of temperature and precipitation with important

ВАСИЛЬЕВ и др.

climate indices such as the North Atlantic oscillation (NAO), Atlantic multidecade oscillation (AMO) and Arctic oscillation (AO). A number of important cycles in different frequency ranges is identified. Cross-wave-let analysis of the NAO, AO with precipitation and temperature series showed a higher density of links compared to AMO. The strong link of high frequency oscillations in precipitation and temperature of the study area with fluctuations of the NAO, AMO and AO is established that can be determined not only by these climate indices, but the relationship of these Atlantic fluctuations with the El Niño phenomenon. Possibly, mid-frequency oscillations of meteorological data of the area with periods of 7–11 years are the evidence of the link with the fluctuation of the NAO. The established coherence of the index of the AMO and observational data is localized at time intervals before and after 1970, which is consistent with quasi-cyclic changes in the Earth's climate.

Keywords: wavelet analysis, cross-wavelet analysis, average annual air temperature, annual sum of atmospheric precipitation, climatic indices, correlation links.

Введение. Процессы, протекающие в атмосфере, представляют собой сложную нестационарную стохастическую систему [5]. Наряду со стохастической динамикой, изменчивость атмосферы характеризуется наличием квазипериодических колебаний на различных временных масштабах, обусловленных как внешним воздействием, так и внутренней динамикой. К настоящему времени получены данные о том, что процессы в атмосфере связаны с индексами солнечной активности [2, 4, 6, 16] совместными модами изменчивости в системе "океан-атмосфера" [9], такими как, например, Эль-Ниньо/Южное колебание (ЮК) [8, 13] и Атлантическое мультидекадное колебание (АМК) [10, 34]. Установлено, что явление ЮК, с периодами колебаний примерно 4 года, определяет режим осадков и температуры воздуха в Тихоокеанском бассейне [36]. Для некоторых регионов Северной Америки и Европы, обнаружены дальние связи индексов Североатлантического колебания (САК), АМК и Арктической осцилляцией (АО) (характерные периоды 7-11, 22-40 и 40-80 лет, соответственно) с режимом осадков, температуры и стока рек [3, 7, 15, 32]. Для распознания таких нестационарных процессов в последнее время все чаше используется метод вейвлет-анализа [1], появление и первоначальное развитие которого обязано работам [14, 24]. Следует отметить, что в исследованиях такого рода наибольший интерес представляет определение характера случайного процесса и понятия причин, приводящих к колебаниям атмосферных параметров, отличающихся характеристичными периодичностями или циклами.

Установление методом вейвлет-анализа периодов колебаний различных параметров состояния атмосферы еще не является, однако, окончательным этапом исследования, поскольку из простого совпадения частот не следует искомая причинноследственная связь между анализируемыми характеристиками/параметрами. Для решения такой задачи наиболее часто используется кросс-вейвлет анализ [22], позволяющий произвести оценку

когерентности колебаний и степени тесноты связи исследуемых данных. Особую сложность при этом имеют исследования связанные с колебаниями, которые проявляются не на всем временном интервале наблюдений, а только в отдельных временных диапазонах (различные по масштабу временные серии), а также распознание исключительно региональных (на основе данных с конкретных метеорологических станций, гидрологических постов или обсерваторий) циклов и отделение их от таковых, имеющих планетарный характер. Так в работе [21] на основе вейвлета Майера (Meyer) выявлены внутривековые циклы ЮК при анализе 40-летнего ряда наблюдений приповерхностной температуры Тихого океана. Использование вейвлетов помогло обнаружить бидекадные (квази-двадцатилетние) периоды температурных рядов северного полушария на протяжении XX в. [25, 26].

Анализ индекса холодных облаков [12], проведенный при помощи вейвлета Морле (Morlet), способствовал обнаружению высокочастотных циклов (от полусуточных периодов до нескольких суток) при изучении конвекционных процессов на разных широтах в Южном полушарии. Следует выделить исследования [23, 24], в которых показаны примеры применения вейвлетов в различных геофизических исследованиях и рассмотрены методики по определению статистической значимости выявленных периодов в исходных сигналах. В этом ряду особое место занимает работа Торренса и Компо [33], в которой, используя стандартный статистический аппарат, впервые предложена процедура проверки на значимость частот вейвлет спектра.

В данной статье метод вейвлет преобразования (ВП) использовался для анализа временных рядов среднегодовых значений приповерхностной температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков некоторых крупных городов Европейской части России. Преследовались такие цели, как: (1) выявление периодичностей метео-данных на разных временных масштабах с приведением оценки статистической значимости и (2) установление причины этих изменений, а также определение пространственно-временных масштабов проявления когерентности в вариациях температуры и атмосферного давления и вычисление степени тесноты связи этих колебаний с климатическими индексами САК, АМК и АО.

Исходные данные и исследуемая территория. Базой для анализа в работе послужили среднегодовые значения температуры воздуха и годовые суммы атмосферных осадков за последние 100-150 лет. Архивные материалы (находятся в свободном доступе на сайте Росгидромета: http://meteoinfo.ru) были взяты с метеорологических станций (МС), расположенных в Европейской части России, а именно: города Мурманск, Архангельск, Санкт-Петербург, Пермь, Нижний Новгород, Казань, Уфа, Оренбург, Ростов-на-Дону и Астрахань (рис. 1). Были вычислены нормы температуры воздуха и атмосферных осадков для этих станций (таблица), а сами станции в таблице расположены в направлении север-юг. Для установления возможных связей в работе проведен кросс-вейвлет анализ, колебаний рядов температуры и осадков с основными климатическими индексами для данной территории. Таковыми индексами, по Харреллу и Каплану [18, 28], являются: САК (1825-2015 гг.) - характеризующий аномалии высоты геопотенциала в северо-атлантическом секторе на высоте 500 $e\Pi a$, АМК (1856-2015 гг.) - представляющий долгопериодное изменение приповерхностной температуры в северной части Атлантического океана и АО (1899-2015 гг.) - являющийся первой модой



Рис. 1. Исследуемая территория и расположение метеорологических станций (МС). Цифрами указаны МС: *1* – г. Мурманск, *2* – г. Архангельск, *3* – г. Санкт-Петербург, *4* – г. Пермь, *5* – г. Нижний Новгород, *6* – г. Казань, *7* – г. Уфа, *8* – г. Оренбург, *9* – г. Ростов-на-Дону, *10* – г. Астрахань.

разложения на естественные ортогональные функции аномалий высоты поверхности геопотенциала 1000 *гПа* во внетропической зоне Северного полушария (20° с.ш. – 90° с.ш. Данные взяты с сайта NOAA: *http://www2.cgd.ucar.edu*.

Метеорологическая станция (синоптический индекс)	Координаты местоположения	Период наблюдений за температурой (годы)	Период наблюдений за осадками (годы)	Т _{год.} (° <i>С</i>)	$\begin{array}{c} T_{XII-II}\\ (^{\circ}C) \end{array}$	T _{VI–VIII} (° <i>C</i>)	Годовое количество осадков (<i>мм</i>)
г. Мурманск (22113)	68°58′с.ш. 33°03′ в.д.	1919-2015	1938-2015	0.5	-9.3	11.16	443
г. Архангельск (22580)	64°30′с.ш. 40°43′ в.д.	1814-2015	1913-2015	0.7	-12.0	13.96	544
г. Санкт-Петербург (26063)	59°58′с.ш. 30°18′ в.д.	1834-2015	1884-2015	4.5	-6.8	16.34	589
г. Пермь (28224)	58°00'с.ш. 56°30' в.д.	1883-2015	1922-2015	1.8	-13.3	16.48	594
г. Нижний Новгород (27459)	56°16′с.ш. 44°00′ в.д.	1873-2015	1923-2015	3.9	-10.0	17.53	575
г. Казань (27595)	55°80'с.ш. 49°30' в.д.	1828-2015	1912-2015	3.9	-11.9	18.17	500
г. Уфа (28722)	54°72′с.ш. 55°83′ в.д.	1888-2015	1920-2015	3.0	-12.8	18.06	529
г. Оренбург (35121)	51°68′с.ш. 55°10′ в.д.	1886-2015	1924-2015	4.4	-12.8	20.71	343
г. Ростов-на-Дону (34730)	47°16′с.ш. 39°49′ в.д.	1881-2015	1924-2015	9.1	-4.0	21.94	546
г. Астрахань (34880)	46°28′с.ш. 47°98′ в.д.	1837-2015	1925-2015	9.7	-4.9	23.99	192

Таблица. Нормы основных климатических показателей исследуемого региона

Важно отметить, что природно-климатические условия изучаемого района обладают некоторыми общими признаками, что позволяет отнести его климат к бореальному типу, характеризующемуся свойством континентальности: теплое лето и холодная снежная зима. Вместе с тем огромная протяженность района, как в широтном так и в меридиональном направлениях приводит к существенным различиям в климатических условиях его отдельных территорий. Поэтому установление согласованных колебаний метеоданных для различных мест исследуемого района представляет интерес для понимания динамики регионального климата.

Методы исследований. В исходных данных по температуре содержались пробелы, которые восстановлены с помощью фильтра Калмана, принцип действия и алгоритм работы которого подробно изложены в [19], выборка рядов атмосферных осадков осуществлялась подбором периодов инструментальных наблюдений, в которых отсутствовали пропуски в измерениях. Методами обработки данных наблюдений температуры воздуха и атмосферных осадков являлись ВП и кросс-вейвлет анализ. Первоначально, используя ВП, в рядах температуры и осадков выявлялись "скрытые" периодичности или циклы. Анализ данных на основе непрерывного ВП состоял в следующем. Вейвлет коэффициенты исходного непрерывного временного ряда x(t) вычислялись с помощью интегрального оператора:

$$C_x(s,\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*_{s,\tau}(t) dt, \qquad (1)$$

где $\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi(\frac{t-\tau}{s})$. Материнская функция $\psi(t)$ при этом могла быть как действительной, так

 $\psi(r)$ при этом могла облъ как денствительной, так и комплексной. Параметр *s* определял масштаб, а параметр τ – временную локализацию вейвлета и отвечал за сдвиг. Ядром материнской функции был выбран вейвлет Морле, хорошо проявивший себя ранее и поэтому наиболее часто применяемый в решении подобных геофизических задач. Спектр мощности ВП рассчитывался как квадрат модуля вейвлет коэффициентов следующим образом:

$$W_x(s,\tau) = \left| C_x(s,\tau) \right|^2.$$
(2)

Определение периодов колебаний исходного погодного сигнала производилось на основе глобального и локального спектров мощности по методике, описанной в [33].

После этого ряды атмосферных осадков и температуры, вместе с основными климатическими показателями, проверялись на наличие связи. Оценка степени тесноты такой связи производилась с помощью кросс-вейвлет преобразования (КВП), процедура которого вкратце заключается в следующем. Рассматривались две временные серии в виде X и Y и их вейвлет преобразования $W_n^X(s)$ и $W_n^Y(s)$, где n – временной интервал. Кросс-вейвлет спектр этих временных серий вычислялся следующим образом, согласно [23]:

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s)W_n^{Y*}(s).$$
 (3)

Символом * в (1) и (3) обозначено комплексное сопряжение. Полученная таким образом мощность кросс-вейвлета $W_n^{XY}(s)$ фактически определяет когерентность колебаний между двумя анализируемыми рядами как функцию периода сигнала и его временной эволюции с 95% значимостью.

Последним этапом анализа было исследование локальной корреляции или, иначе говоря, частотно-временной локализации связи двух вариаций, которая рассчитывалась следующим образом [17]:

$$R_n^2(s) = \frac{\left| S\left(s^{-1} W_n^{XY}(s)\right) \right|^2}{S\left(s^{-1} \left| S\left(W_n^X(s)\right) \right|^2\right) \cdot S\left(s^{-1} \left| W_n^Y(s) \right|^2\right)}, \quad (4)$$

где *S* – оператор усреднения по времени и частоте.

Вычислительные процедуры с последующей визуализацией расчетов, как и построение карты, были выполнены в программном пакете Matlab (*http://www.mathworks.com*) с частичным использованием среды IDL (*http://www.ittvis.com/IDL7*).

Результаты. Данные наблюдений среднегодовых значений приповерхностной температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков исслелуемого района Европейской территории России (ЕТР), а также индексы САК, АМК и АО были проанализированы методом ВП на основе вейвлета Морле. Приведем вначале краткие характеристики результатов вейвлет-анализа по данным приповерхностной температуры воздуха (рис. 2) и сумм атмосферных осадков (рис. 3). Выявленные циклы в колебаниях основных метеорологических величин можно условно разделить на три группы, первая – высокочастотные с периодами от 2.3-2.7 до 7.2-8.1 лет, вторая - среднечастотные 11.2-22.1 лет и низкочастотные с периодами от 35.1 и более лет.

Тесная корреляционная связь (0.52–0.93) анализируемых температурных рядов определила и схожесть во временной локализации выявленных периодов колебаний, по сравнению с рядами



Рис. 2. Локальные и глобальные спектры мощности температурных рядов МС: а – Мурманск, б – Архангельск, в – Санкт-Петербург, г – Пермь, д – Нижний Новгород, е – Казань, ж – Уфа, з – Оренбург, и – Ростов-на-Дону, к – Астрахань.

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ № 6 2017



Рис. 3. Локальные и глобальные спектры мощности рядов атмосферных осадков МС: а – Мурманск, б – Архангельск, в – Санкт-Петербург, г – Пермь, д – Нижний Новгород, е – Казань, ж – Уфа, з – Оренбург, и – Ростов-на-Дону, к – Астрахань.



Рис. 4. Локальные и глобальные спектры мощности основных климатических индексов: а – САК/NAO, б – АМК/АМО, в – СГМ/NAM.

атмосферных осадков, в которых динамика выявленных циклов более разнообразна, а величина коэффициентов корреляции менее значима (0.25–0.49).

Для установления возможной связи колебаний исследованных рядов осадков и температур с индексами САК, АМК и АО, аналогичный вейвлет анализ был также проведен и для этих климатических индексов. В индексе САК (рис. 4а) на всем доступном интервале, с 1825 по 2015 гг., статистически значимыми были найдены квазидвухлетний, пятилетний, одиннадцатилетний, двадцатидвухлетний и тридцатилетний периоды, обнаруженный 60-летний цикл оказался статистически незначимым. АМК (рис. 4б) на временном интервале 1856–2015 гг., имеет характерные двухлетние, 11-летние, 22-летние циклы и периоды продолжительностью 35 и более лет. Для индекса АО (рис. 4в) на интервале 1899–2015 гг. значимыми были выявлены циклы с периодами 2.3, 7.2, 11.2, 22.1, лет. Циклы 35.1 и 75.3 года не могут быть однозначно интерпретированы, в силу специфики локализации таковых и длительности рядов наблюдений. Выявленные циклы колебаний в индексах САК, АМК и АО хорошо известны (см., например, работы [20, 27, 30, 35]). Проявленный в колебаниях всех трех климатических индексах 11 и 22-летний цикл по всей видимости связан с известными солнечными циклами [31], исследование влияние которых не входило в планы работы.



Рис. 5. Кросс-вейвлет спектры индекса САК/NAO и температурных рядов МС: а – Мурманск, б – Архангельск, в – Санкт-Петербург, г – Пермь, д – Нижний Новгород, е – Казань, ж – Уфа, з – Оренбург, и – Ростов-на-Дону, к – Астрахань.



Рис. 6. Кросс-вейвлет спектры индекса САК/NAO и рядов атмосферных осадков МС: а – Мурманск, б – Архангельск, в – Санкт-Петербург, г – Пермь, д – Нижний Новгород, е – Казань, ж – Уфа, з – Оренбург, и – Ростов-на-Дону, к – Астрахань.

2017

На следующем этапе иссследования теснота связи и согласованность/когерентность колебаний рядов атмосферных осадков, температуры воздуха с индексами САК, АМК и АО проверялась методом кросс-вейвлет анализа. Поскольку анализ индексов САК и АО оказался идентичным, в качестве примера, были приведены результаты только с индексом САК. Кросс-корреляции температуры с САК и АМК показаны на рис. 5 и 7 по осадкам с соответствующими индексами на рис. 6 и 8. Направление стрелок на этих рисунках указывает характер выявленных колебаний: вправо - синфазно с САК/АМК, влево – противофазно, направление стрелок вверх или вниз говорит соответственно об опережении или запаздывании на $\frac{\pi}{2}$ колебаний ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ № 6

метеоданных по сравнению с колебаниями индексов. Для установления количественной меры тесноты связи в разных временных масштабах были рассчитаны корреляционные отношения для колебаний исследуемых параметров.

Кросс-вейвлет анализ данных температуры атмосферного воздуха с индексом САК установил синфазный характер в колебаниях для МС расположенных вблизи морских акваторий, по мере удаления в глубь континента тип когерентности менялся на противоположный и влияние индекса ослабевало. КВП температурных рядов с индексом АМК выявил статистически значимую связь в низкочастотной области колебаний, тип когерентности синфазный для большинства станций наблюдений, кроме МС Мурманск, Архангельск,



Рис. 7. Кросс-вейвлет спектры индекса АМК/АМО и температурных рядов МС: а – Мурманск, б – Архангельск, в – Санкт-Петербург, г – Пермь, д – Нижний Новгород, е – Казань, ж – Уфа, з – Оренбург, и – Ростов-на-Дону, к – Астрахань.

Санкт-Петербург. Влияние индекса АО на колебания приповерхностной температуры воздуха оказалось самым сильным, как в высокочастотной, так и низкочастотной областях, тип когерентности для всех МС установлен — противофазный. При этом наблюдалось ослабление воздействия индекса АО по мере продвижения с севера на юг исследуемой территории.

Результаты анализа на установление когерентности в колебаниях рядов атмосферных осадков с индексом САК показали статистически значимую связь в низкочастотной области. Характер колебаний преимущественно противофазный для большинства метеостанций, за исключением МС Пермь и Нижний Новгород. Установлено, в высокочастотной области, по мере продвижения на юг исследуемой территории, влияние САК на характер колебаний осадков усиливалось. КВП осадков с индексом АМК обнаружило зональный характер влияния. Высокая теснота связи характерна для МС находящихся на малом удалении от морей, тип когерентности синфазный. Для индекса АО с осадками, также как и для температурных рядов, установлена тесная связь, тип когерентности противофазный, влияние ослабевает по направлению движения на юг территории. На всех статистически значимых периодах в КВП, величина коэффициента корреляции варьировалась от 0.74 до 0.97.



Рис. 8. Кросс-вейвлет спектры индекса АМК/АМО и рядов атмосферных осадков МС: а – Мурманск, б – Архангельск, в – Санкт-Петербург, г – Пермь, д – Нижний Новгород, е – Казань, ж – Уфа, з – Оренбург, и – Ростов-на-Дону, к – Астрахань.

Заключение. В данной работе методом вейвлет преобразования проведен анализ рядов приповерхностной температуры воздуха и сумм атмосферных осадков для некоторых крупных городов Европейской части России. Результатом этого исследования стало установление нескольких метеорологических циклов различных по продолжительности и частоте проявления. Для связи этих циклов с естественными климатическими осцилляциями, такими как САК, АМК и АО известными своим сильным влиянием на климат западной Европы, проведен кросс-вейвлет анализ. Следует отметить, что САК и АО являются индексами зимней изменчивости атмосферной циркуляции. Для исследуемого региона изменчивость температуры

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ № 6 2017

зимой вносит преобладающий вклад в годовую изменчивость. Для осадков вклад зимний осадков менее существенен. Тем не менее, анализ связи со среднегодовыми величинами важен для совместной оценки влияния мод атмосферной изменчивости и колебаний температуры океана, связанных с АМК и ЮК.

Анализ осцилляций осадков исследуемого района методом КВП показал в целом несколько большую связь с индексами САК и АО, чем с индексом АМК. Это не является удивительным, поскольку и в западной Европе, где влияние обоих этих климатических циклов много сильнее, осадки больше зависят от флуктуаций САК. Согласно результатам данного исследования, флуктуации САК и АМК оказывают большее влияние на высокочастотные колебания осадков европейской части России, чем на их среднечастотные составляющие. Однако даже в этом случае в целом следует отметить эпизодичность и кратковременность этого влияния. Хотя и тоже довольно эпизодически, но когерентность САК и колебаний осадков низкой частоты просматривается почти для всех городов района, за исключением, пожалуй, только Архангельска. Отметим при этом наиболее сильное влияние САК на промежуточные пункты исследуемого района в направлении Север-Юг. Несмотря на отмеченную выше эпизодичность связей САК и осадков, можно отметить близость временных интервалов для низкочастотных колебаний осадков для городов ближе расположенных друг к другу по оси Север-Юг, таких как Пермь-Уфа или Оренбург-Астрахань.

В отличие от осадков, влияние индексов САК и АО установлено более сильным на соответствующие колебания температур исследуемого района в конце XIX и в XX вв. Оба климатических индекса проявляют когерентность с высокочастотными колебаниями температур, причем влияние АО найдено гораздо более разнообразным во временном интервале практически для всех городов района. Для средних и особенно низких частот установлена обратная картина, когда в целом связь с колебаниями САК оказалась сильней и разнообразней. До проведения данного исследования наиболее сильным ожидалось влияние индексов САК и АМК на метеоданные МС Архангельск как самого западного пункта района и наиболее близкого к Атлантике. Результаты вейвлет-анализа показали, однако, что метеоданные Архангельска не сильно отличаются от аналогичных данных других городов исследуемого района. В условно промежуточном районе, куда можно отнести МС Казани, Перми и Уфы найдены более разнообразные совпадения в колебаниях температуры и осадков с климатическими индексами. Интересно отметить также, что при движении на юг от МС Пермь к МС Уфа, влияние САК и АМК на погодный режим найдено увеличивающимся. В то же время, для этого промежуточного района (МС Уфа и Пермь) высокая степень связи высокочастотных колебаний температуры и осадков с АМК и САК найдена синфазной, в то время как низкочастотные циклы колебаний установлены находящимися в противофазе с колебаниями климатических индексов.

Установленная высокая связь высокочастотоных колебаний осадков и температур исследуемого района с аналогичными по частоте флуктуациями САК, АМК и АО может определяться не только и не столько самими этими климатическими индексами, сколько связью этих атлантических флуктуаций с явлением Эль-Ниньо [27]. Среднечастотные колебания метеоданных района с периодоами 7—11 лет возможно действительно являются свидетельством связи с флуктуации САК. Установленная когерентность индекса АМК и данных наблюдений локализуется на временных интервалах до и после 1970 г., что согласуется с квазициклическими изменениями климата Земли [11]. Вполне может быть, что цикличность индекса АМК в 50—70 лет не проявилась в исследовании на когерентность в виду короткости рядов наблюдений на метеостанциях.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Программ Президиума РАН и, в части анализа изменчивости температуры, РФФИ (проект № 17-05-00561).

Acknowledgments. The study was supported by Programms of the Presidium of RAS and, in a part of analysis of temperature variability, by Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-05-00561).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
- 2. Васильев Д.Ю., Лукманов Р.Л., Ферапонтов Ю.И., Чувыров А.Н. Цикличность гидрометеорологических характеристик на примере Башкирии // ДАН. 2013. Т. 448. № 1. С. 131–134.
- 3. Васильев Д.Ю., Сивохип Ж.Т., Чибилев А.А. Динамика климата и внутривековые колебания стока в бассейне реки Урал // ДАН. 2016. Т. 469. № 1. С. 102–107.
- 4. Васильев Д.Ю., Ферапонтов Ю.И. Тренды в колебаниях приземной температуры атмосферного воздуха на примере Башкирии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 1. С. 77–86.
- Кляцкин В.И. Современные методы статистического описания динамических стохастических систем // УФН. 2009. Т. 179. № 5. С. 547–553.
- Мохов И.И. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и приповерхностной температуры Земли // Изв. РАН. ФАО. 2008. Т. 44. № 3. С. 283–293.
- 7. Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А. Оценка связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений // ДАН. 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231.
- 8. Нестеров Е.С. О влиянии температуры воды и потоков тепла на поверхности океана в Северной

Атлантике на циркуляцию атмосферы // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 39–46.

- 9. Попова В.В. Структура многолетних колебаний атмосферных осадков на Русской равнине // Изв. РАН. Сер. геогр. 1999. № 3. С. 40-50.
- Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Роль границ морского льда и температуры поверхности океана на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. ФАО. 2012. Т. 48. № 4. С. 1–18.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М: Росгидромет, 2008. 227 с.
- Chapa S.R., Rao V.B., and Prasad G.S.S.D. Application of wavelet transform to meteosat-derived cold cloud index data over South America // Mon. Weather Rev. 1998. 126. P. 2466–2481.
- Chekroun M.D., Kondrashov D., and Ghil M. Predicting stochastic systems by noise sampling, and application to the El Niño-Southern Oscillation // PNAS. 2011. Vol. 108. № 29. P. 11766–11771. DOI:10.1073/pnas.1015753108.
- 14. *Daubechies I*. Ten Lectures on Wavelets. Society for Industrial and Applied Mathematics. 1992. 357 p.
- Ionita M., Lohmann G., Rimbu N., and Scholz P. Dominant modes of Diurnal Temperature Range variability over Europe and their relationships with large-scale atmospheric circulation and sea surface temperature anomaly patterns // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. D15111. DOI:10.1029/2011JD016669.
- Gray L.J., Beer J., Geller M., Haigh J.D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G.A., Shindell D., van Geel B., and White W. Solar influences on climate // Rev. Geophys. 2010. 48. RG4001. DOI:10.1029/2009RG000282.
- Grinsted A., Moore J.C., and Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Processes in Geophysics. 2004. Vol. 11. P. 561–566. SRef-ID:1607-7946/ npg/2004-11-561.
- Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation // Science. Vol. 269. P. 676–679.
- Chronin A.J. and Morzfeld M. Conditions for successful data assimilation // J. Geophys. Res. 2013. Vol. 118. 11. P. 511–533. DOI:10.1002/2013JD019838, 2013.
- 20. *Kerr R.A.* A north Atlantic climate pacemaker for the centuries // Science. 2000. Vol. 288. P. 1984–1986.
- Mak M. Orthogonal wavelet analysis: Interannual variability in the sea surface temperature // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1995. 76. 11. P. 2179–2186.
- Maraun D. and Kurths J. Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls // Nonlinear Processes in Geophysics. 2004. Vol. 11. P. 505–514. SRef-ID:1607-7946/ npg/2004-11-505.

- Maraun D., Kurths J., and Holschneider M. Nonstationary Gaussian processes in wavelet domain: Synthesis, estimation, and significance testing // Phys. Rev. 2007. E75. DOI:10.1103/PhysRevE.75.016707.
- Meyers S.D., Kelly B.G., and O'Brien J.J. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves // Mon. Weather Rev. 1993. 121. P. 2858–2866.
- 25. *Minobe T. and Shouji A*. Maximal wavelet filter and its application to bidecadal oscillation over the Northern Hemisphere through the twentieth century // J. Climate. 2002. 15. P. 1064–1075.
- Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., and Karlen W. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and highresolution proxy data // Nature. 2005. 433. P. 613–617.
- Nyberg J., Malmgren B.A., Winter A., Jury M.R., Kilbourne K.H., and Quinn T.M. Low Atlantic hurricane activity in the 1970s and 1980s compared to the past 270 years // Nature. 2007. Vol. 447. P. 698–701. DOI: 10.1038/nature05895.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., and Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century// J. Geophys. Res. 2003. 108 (D14). 4407. DOI:10.1029/2002JD002670.
- 29. *Rossi A., Massei N., and Laignel B.* A synthesis of the time-scale variability of commonly used climate indices using continuous wavelet transform // Global Planetary Change. 2011. Vol. 78. P. 1–13.
- Schlesinger M.E., and Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // Nature. 1994. Vol. 367. P. 723–726.
- Strong K., Saba J., and Kucera T. Understanding space weather: the Sun as a variable star // Bulletin of Amer. Meteor. Soc. 2012.Vol. 93. 9. P. 1327–1335. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00179.1.
- Sutton R.T. and Hodson D.L.R. Atlantic ocean forcing of North American and European summer climate // Science. 2005. Vol. 309. P. 115–118. DOI:10.1126/ science.1109496.
- Torrence C. and Campo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1998. Vol. 79. P. 61–78.
- Tung K-K. and Zhou J. Using data to attribute episodes of warming and cooling in instrumental records // PNAS. 2013. Vol. 110. № 6. P. 2058–2063. DOI:10.1073/ pnas.1212471110.
- Vicente-Serrano S.M. and Lo'pez-Moreno J.I. Nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. D20120. DOI:10.1029/2008JD010382.
- Wang H., Kumar A., Wang W., and Jha B. U.S. summer precipitation and temperature patterns following the peak phase of El Niño // J. Climate. 2012. Vol. 25. 20. P. 7204–7215. DOI:10.1175/JCLI-D-11-00660.1.

REFERENCES

- Astaf'eva N.M. Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Phys. Usp.*, 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145–1170. DOI: 10.1070/PU1996v039n11ABEH000177.
- Vasil'ev D. Yu., Lukmanov R.L., Ferapontov Yu.I., Chuvyrov A.N. Periodicity in the hydrometeorological parameters of Bashkiria. *Dokl. Earth Sci.*, 2013, vol. 448, no. 1, pp. 131–134. DOI:10.1134/S1028334X12110165.
- Vasil'ev D. Yu., Sivohip J.T., Chibilev A.A. Climate dynamics and interdecadal discharge fluctuations in the Ural river basin. *Dokl. Earth Sci.*, 2016, vol. 469, no. 1, pp. 102–107. DOI:10.1134/S1028334X16070096.
- 4. Vasil'ev D. Yu., Ferapontov Yu. I. Tends in the fluctuations of near surface air temperature (a case study of Bashkiria). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2015, no. 1, pp. 77–86. (In Russ.).
- Klyatskin V.I. Modern methods for the statistical description of dynamical stochastic systems. *Phys. Usp.*, 2009, vol. 179, no. 5, pp. 547–553.DOI:10.3367/ UFNe.0179.200905j.0547.
- Mokhov I.I., Smirnov D.A. Diagnostics of a cause-effect relation between solar activity and the Earth's global surface temperature. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 283–293.
- Mokhov I.I., Smirnov D.A., Karpenko A.A. Assessment of the relationship of changes of the global surface air temperature with different natural and anthropogenic factors based on observations. *Dokl. Earth Sci.*, 2012, vol. 443, no. 2, pp. 225–231. DOI: 10.1134/S1028334X12030178.
- Nesterov E.S. Influence of the Surface water temperature and heat flux in the North Atlantic on the atmospheric circulation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, no. 1, pp. 39–46. DOI:10.3103/S106837390901004X.
- Popova V.V. Structure of perennial fluctuations of atmospheric precipitation at the Russian Plaine. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1999, no. 3, pp. 40–50. (In Russ.).
- Semenov V.A., Mokhov I.I., Latif M. Influence of the ocean surface temperature and sea ice concentration on regional climate changes in Eurasia in recent decades. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 1–18. DOI: 10.1134/S0001433812040135.
- 11. Assessment repot on climate change and its impact on the territory of the Russian Federation, vol. 1. Roshydromet, 2008. 278 p. (In Russ.).
- Chapa S.R., Rao V.B., Prasad G.S.S.D. Application of wavelet transform to meteosat-derived cold cloud index data over South America. *Mon. Weather Rev.*, 1998, 126, pp. 2466–2481.
- Chekroun M.D., Kondrashov D., Ghil M. Predicting stochastic systems by noise sampling, and application to the El Niño-Southern Oscillation. *PNAS*, 2011, vol. 108, no. 29, pp. 11766–11771. DOI:10.1073/pnas.1015753108.
- 14. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 357 p.

- Ionita M., Lohmann G., Rimbu N., Scholz P. Dominant modes of Diurnal Temperature Range variability over Europe and their relationships with large-scale atmospheric circulation and sea surface temperature anomaly patterns. J. Geophys. Res., 2012, vol. 117, D15111. DOI:10.1029/2011JD016669.
- Gray L.J., Beer J., Geller M., et al. Solar influences on climate. *Rev. Geophys.*, 2010. 48. RG4001. DOI:10.1029/2009RG000282.
- Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes Geophys.*, 2004, vol. 11, pp. 561–566. SRef-ID:1607-7946/ npg/2004-11-561.
- Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science* 1995, vol. 269, pp. 676–679.
- Chronin A.J., Morzfeld M. Conditions for successful data assimilation. J. Geophys. Res., 2013, vol. 118, 11, pp. 511–533. DOI:10.1002/2013JD019838, 2013.
- 20. Kerr R.A. A north Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 2000, vol. 288, pp. 1984–1986.
- Mak M. Orthogonal wavelet analysis: Interannual variability in the sea surface temperature. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, 76, 11, pp. 2179–2186.
- Maraun D., Kurths J. Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls. *Nonlinear Processes Geophys.*, 2004, vol. 11, pp. 505–514. SRef-ID:1607-7946/npg/2004-11-505.
- Maraun D., Kurths J., Holschneider M. Nonstationary Gaussian processes in wavelet domain: Synthesis, estimation, and significance testing. *Phys. Rev.*, 2007. E75. DOI: 10.1103/PhysRevE.75.016707.
- Meyers S.D., Kelly B.G., O'Brien J.J. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves. *Mon. Weather Rev.*, 1993, 121, pp. 2858–2866.
- 25. Minobe T., Shouji A. Maximal wavelet filter and its application to bidecadal oscillation over the Northern Hemisphere through the twentieth century. *J. Climate*, 2002, 15, pp. 1064–1075.
- Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlen W. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and highresolution proxy data. *Nature*, 2005, 433, pp. 613–617.
- Nyberg J., Malmgren B.A., Winter A., Jury M.R., Kilbourne K.H., Quinn T.M. Low Atlantic hurricane activity in the 1970s and 1980s compared to the past 270 years. *Nature*, 2007, vol. 447, pp. 698–701. DOI: 10.1038/nature05895.
- 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.*, 2003. 108 (D14). 4407. DOI:10.1029/2002JD002670.

- Rossi A., Massei N., Laignel B. A synthesis of the timescale variability of commonly used climate indices using continuous wavelet transform. *Global Planetary Change*, 2011, vol. 78, pp. 1–13.
- Schlesinger M.E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 1994, vol. 367, pp. 723–726.
- Strong K., Saba J., Kucera T. Understanding space weather: the Sun as a variable star. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, vol. 93, no. 9, pp. 1327–1335. DOI: 10.1175/ BAMS-D-11-00179.1.
- Sutton R.T., Hodson D.L.R. Atlantic ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, 2005, vol. 309, pp. 115–118. DOI:10.1126/ science.1109496.

- Torrence C. and Campo G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, vol. 79, pp. 61–78.
- Tung K-K., Zhou J. Using data to attribute episodes of warming and cooling in instrumental records. *PNAS*, 2013, vol. 110, no. 6, pp. 2058–2063. DOI:10.1073/ pnas.1212471110.
- Vicente-Serrano S.M., Lopez-Moreno J.I., Nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European Precipitation. J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, D20120. DOI:10.1029/2008JD010382.
- Wang H., Kumar A., Wang W., Jha B.U.S. summer precipitation and temperature patterns following the peak phase of El Niño. *J. Climate.*, 2012, vol. 25, 20, pp. 7204–7215. DOI:10.1175/JCLI-D-11-00660.1.