

УДК 551 (510.53:590.21:510.4)

ОСОБЕННОСТИ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В РЕГИОНЕ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Р.Д. Гайнутдинова, Д.Н. Крымская

*Институт физико-технических проблем и материаловедения
Национальной академии наук Кыргызской Республики,
Кыргызская Республика, Бишкек
epfk@rambler.ru*

В целях выделения физически значимых частотных и временных компонентов для последующего анализа, рассматриваются возможности использования вейвлет-преобразования в качестве инструмента для анализа многолетних рядов данных приземной температуры атмосферы и солнечной активности над Кыргызстаном.

Ключевые слова: атмосфера, температура, солнечная активность, климат, спектральный анализ.

Введение

Для получения информации о периодических процессах в вариациях параметров климатических параметров обычно применяется спектральный анализ временных рядов. При анализе результатов исследований важное значение имеет правильный выбор методов обработки экспериментального материала.

На основе спектрального анализа временных рядов был исследован частотный состав многолетних вариаций приземной температуры и исследованы закономерности изменения параметров термического режима атмосферы в регионе Кыргызстана В [1] были исследованы фоновые колебания и трендовые составляющие многолетних рядов температуры нижней атмосферы для зимнего и летнего сезонов.

Изучение региональных особенностей временных изменений температуры приземной атмосферы за длительный период времени начиная с 1930 года по настоящее время имеет важное значение, поскольку они отражают климатические изменения температурного режима над Кыргызстаном, в том числе и над частью Центральноазиатского региона [1].

В последние годы показано, что глобальные климатические изменения складываются из региональных изменений. Особенно важно, что часто региональные климатические параметры на относительно коротком

периоде времени имеют противоположные знаки. При этом региональные особенности оказывают решающее влияние на перераспределение потоков тепла в рамках общеизвестных законов, обусловленных меняющимся положением Земли относительно Солнца. Таким образом, изучение региональных особенностей изменения температурного режима приземной и нижней атмосферы над частью Центральноазиатского региона имеет важное значение. Данная работа посвящена характеристикам изменчивости региональных долгопериодных вариаций температурного режима над Кыргызстаном.

Методы анализа экспериментальных данных

При анализе статистических рядов метеорологических параметров используются различные математические аппараты. Для выявления скрытых периодичностей ранее широко использовался спектральный анализ разложения временных рядов – метод Блекмана и Тьюки, впоследствии широкое распространение получил более точный метод максимальной энтропии [2].

В последние годы более широкое распространение получило вейвлет-преобразование временных рядов различных параметров [3]. В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование имеет самонастраивающееся подвижное частотно-временное окно и хорошо выявляет как низко-частотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах. Этот метод дает двумерную развертку исследуемого сигнала, где масштаб (частота) и время считаются независимыми переменными.

В вейвлет-анализе используются быстро спадающие солитоноподобные функции. Это позволяет проводить локализованный анализ структуры сигналов, что особенно важно при изучении процессов с меняющимися во времени характеристиками. Преимущество вейвлет-анализа перед другими методами заключается в быстром Фурье-анализе без осреднения выделяемых частот по всему ряду с детальным, микроскопическим анализом на скейлограммах как в длинноволновой, так и короткопериодной части спектра.

Вейвлет-анализ применяется для изучения сложных природных динамических систем и процессов, протекающих в них. Он широко применяется при анализе геофизических, радиофизических и биомедицинских данных, для которых методы Фурье-анализа оказываются недостаточно информативными [4].

В Фурье-анализе это связано прежде всего с соотношением неопределенностей анализируемых параметров, которое заключается в том, что не может быть одновременно достигнуто хорошее разрешение по времени и по частоте. Другим недостатком Фурье-анализа, связанным с соотношением неопределенностей, является то, что он неустойчив к малым возмущениям: незначительная ошибка в одном из коэффициентов спектрального разложения приводит к перестройке всего сигнала во времени.

Вейвлет-преобразование строится на основе единственной базисной функции, имеющей солитоноподобный характер. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье, вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности температурных изменений. Одно из главных преимуществ этого метода заключается в том, что он дает достоверные результаты при анализе нестационарных рядов, какими являются ряды приземной температуры на интервалах более 26–30 лет. Помимо этого он дает двумерную развертку одномерного процесса, когда частота ω и время t – независимые переменные, что позволяет анализировать сигнал сразу в двух пространствах:

$$\varphi(t) = e^{-\beta t} e^{-j\omega t} = e^{-\beta t} (\cos \omega t - j \sin \omega t),$$

где φ – значение вейвлет-функции, ω – волновой параметр, β – вейвлет-коэффициент.

Для анализа данных температурных рядов использовался непрерывный вейвлет-анализ, вейвлет Морле, позволяющий детально проанализировать на скейлограммах весь временной спектр частот – от высоких частот более мелкого масштаба до низкочастотных колебаний, имеющих более крупный масштаб. Непрерывное вейвлет-преобразование помимо целочисленных масштабов выделяет дробные масштабы.

Результаты экспериментальных расчетов

Рассмотрим временные изменения среднесуточных и среднемесячных вариаций температуры приземной атмосферы по данным метеостанций (МС) Бишкек (760 м над у.м.), МС Нарын (2040 м над у.м.) и МС Тянь-Шань (3700 м над у.м.) за период регулярных наблюдений с 1930 по 2008 год. Расположение станций на высотах от 700 до 3700 м дает возможность исследовать периодические процессы на разных уровнях атмосферы. Анализ этих данных показал, что по данным МС Бишкек начиная с 1930 г. среднегодовая температура на высоте 760 м повысилась от 9,5 до 12 °С в 2006 году. По данным МС Нарын на высоте 2040 м также отмечается непрерывный рост температуры от 1,5 до 4,5 °С за тот же период времени. Особо выделяется высота 3700 м, где по данным МС Тянь-Шань температура с 1930 по 2006 г. возросла от -8,5 до -6,5 °С. Если по МС Бишкек и Нарын за 75-летний период произошло повышение температуры на $\Delta T = 3$ °С, то на уровне МС Тянь-Шань за тот же период скорость потепления снизилась до $\Delta T = 2$ °С.

Для анализа использовались аномалии среднегодовых температур $\Delta T_i(t)$ за вычетом температурного тренда T_{mp} , вычисленного методом наименьших квадратов. Далее рассмотрим более детально периодические колебания в температурных вариациях методом разложения используя метод Фурье-преобразования [3]. Результаты спектрального анализа временных вариаций температуры в нижней атмосфере представлены на рис. 1. По оси абсцисс период указан в годах.

Рассматривая периодические колебания температуры, можно выделить в них основную частотную составляющую с периодом около 30–32 лет. При этом основная 11-летняя периодичность не просматривается и никак не связана с существующими экстремумами в вариациях колебаний температуры. Анализ этих данных за холодное полугодие показал, что основная периодичность в колебаниях температуры в этот период составляет 26–28 лет.

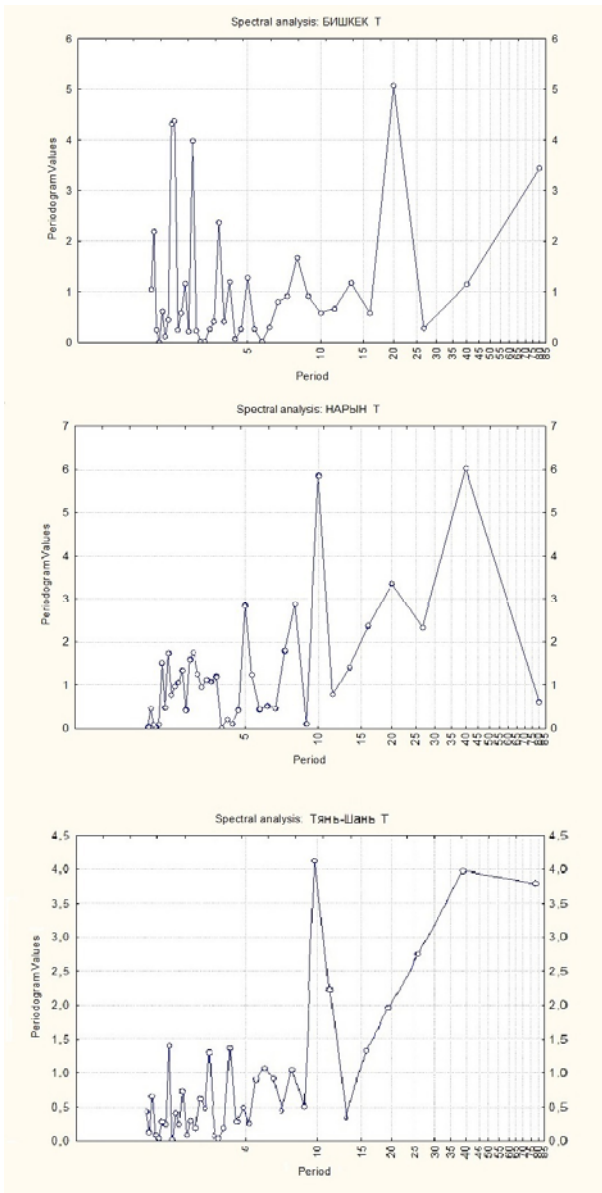


Рис. 1. Результаты спектрального анализа временных вариаций температуры в нижней атмосфере (МС Бишкек, Нарын и Тянь-Шань).

В табл. 1 приведены результаты спектрального анализа, примененного к временным рядам приземной среднегодовой температуры воздуха по данным МС Бишкек, Нарын и Тянь-Шань.

Таблица 1. Периодические составляющие в вариациях приземной среднегодовой температуры воздуха по данным МС Бишкек, Нарын и Тянь-Шань

Станция	Периоды (годы)										
	0,5-1	1-2	3-4	4-5	6-7	8-9	10-12	13-14	20-25	30-40	80-90
Тянь-Шань	1,0	2,0	3,5	4-5	6,5	8,5	11,0	-	22,0	34-38	85-90
Нарын	1,0	2,0	3,5	5,0	6,5	8,5	11,0	-	22,0	40,0	-
Бишкек	1,0	2,0	3,5	5,0	7,0	8,5	12,0	13,0	22,0	-	85-90

Анализ рис. 1 и табл. 1 показывает, что составляющие с периодами от одного года и до 11 лет присутствуют во временных рядах температуры на всех трех высотных уровнях атмосферы: 760, 2040 и 3700 м. Амплитуда одних и тех же частот, выделенных на разных уровнях, различна. Составляющая с периодом в 11 лет наиболее четко проявляется на более верхних уровнях атмосферы. На уровне атмосферы 760 м она менее выражена, поскольку этот слой слишком «зашумлен» техногенными факторами, здесь же наиболее четко выделяются годовая и квазидвухлетняя составляющие.

Далее выделяется 22-летняя составляющая, которая по амплитуде является основной периодичностью в солнечных циклах. Она наиболее четко проявляется в нижних слоях атмосферы (в приземном слое – МС Бишкек и Нарын). На верхних уровнях (МС Тянь-Шань) она менее выражена и представлена в виде возрастающего тренда.

Другой особенностью частотного спектра на верхних уровнях нижней атмосферы является ярко выраженная 34–38-летняя составляющая, она присутствует на уровнях МС Нарын и Тянь-Шань, в нижних слоях не отмечается.

Рассмотрим результаты вейвлет-преобразования, примененного к временным рядам параметра солнечной активности $F_{10,7}$ и приземной среднегодовой температуры воздуха по данным МС Нарын (2040 м над у.м.) и Бишкек (760 м над у.м.). Были рассчитаны отклонения температуры от линейной регрессии $\Delta T_i(t)$, из которых исключен средний многолетний тренд по данным МС Нарын и Бишкек.

Для вейвлет-преобразования использовались аномалии среднегодовых температур $\Delta T_i(t)$ за вычетом температурного тренда T_{mp} , вычисленного методом наименьших квадратов:

$$\Delta T_i(t) = T_i(t) - T_{mp}.$$

К этим рядам температур и солнечной активности было применено непрерывное вейвлет-преобразование.

На рис. 2 а–в приведены результаты расчетов частотного состава исходных рядов $\Delta T_i(t)$ по данным МС Бишкек и Нарын, а также параметра солнечной активности $F_{10,7}$, выполненные методом непрерывного вейвлет-преобразования. Анализируемый ряд по МС Нарын охватывает 110-летний период измерений температуры начиная с 1897 года, по Бишкеку – с 1927 года по настоящее время.

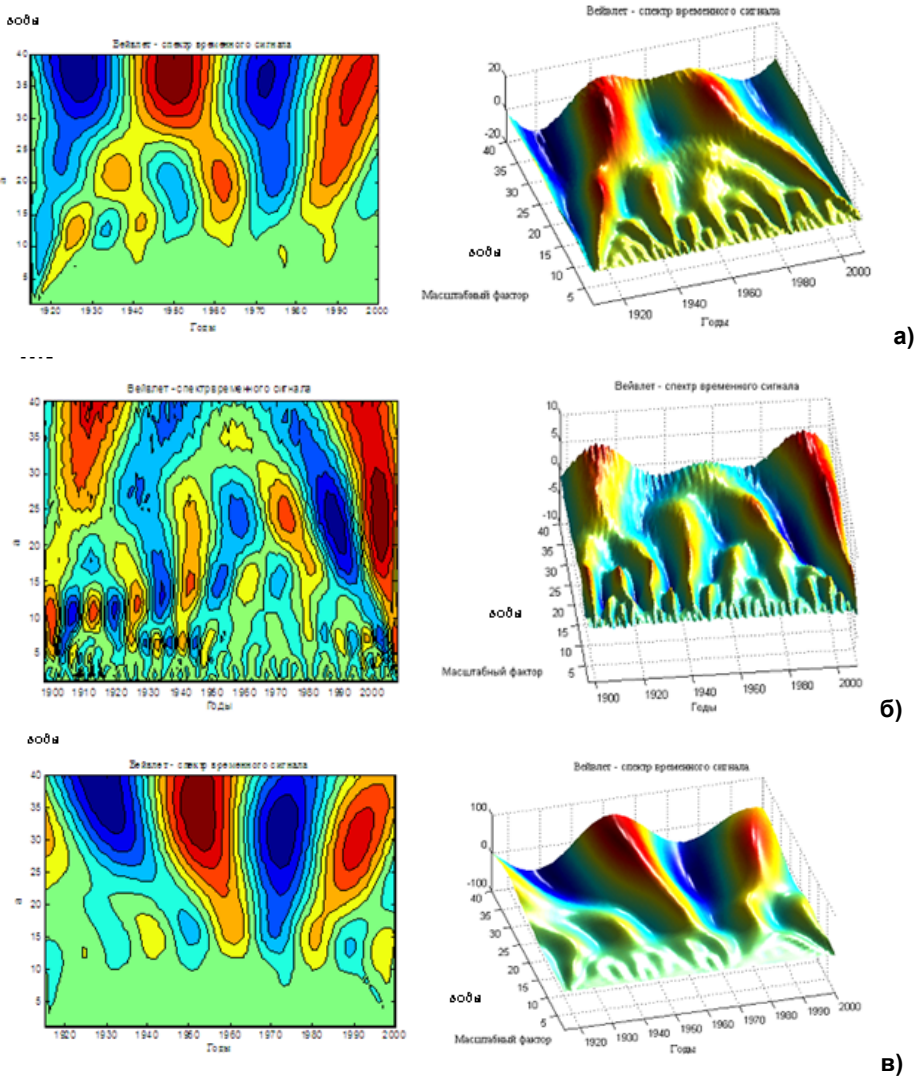


Рис. 2. Скейлограммы вейвлет-преобразования рядов температуры по данным МС Бишкек (а) и Нарын (б) и параметра солнечной активности $F_{10,7}$ (в).

Из полученных частотных составляющих выделены общие периодичности, присутствующие одновременно в этих рядах и определяемые с уровнем доверительной вероятности $P \geq 0,95$, с периодами 11–12 лет, 20–22 года, 35–40 лет, 50–55 лет и 90–95 лет.

Анализ скейлограмм вейвлет-преобразования этих данных показывает, что в вариациях температуры с вероятностью $P > 0,87$ выделяются пики, соответствующие периодам 2,8–3,0; 5,0–5,5; 8,0; 11–12; 16–18; 21–23; 25–27; 35–37; 40–43; 49–52; 85–95. Подобные периодические составляющие выделены и в вариациях температурных аномалий по данным как МС Нарын, так и МС Бишкек. Практически те же периодичности выделяются и в спектрах вариаций солнечной активности. По данным анализа параметров солнечной активности в Главной геофизической обсерватории были выделены такие же периодические составляющие. Коэффициент корреляции между ними больше 0,5 и является статистически значимым.

Из рис. 2 а–в видно, что основная часть спектра представлена периодами от 11-летних до 40-летних колебаний. Особенностью результатов, полученных с помощью вейвлет-преобразований этих данных, является изменение амплитуды выделенных периодичностей вдоль всего рассматриваемого ряда.

Эти результаты свидетельствуют о реальной связи вариаций температуры с вариациями солнечной активности над средне- и высокогорьем Кыргызстана, расположенного в центральной части Центральноазиатского региона.

В последующем к выделенным периодичностям было применено разложение Фурье с переменным ядром преобразования для определения амплитуд и фаз выделенных составляющих. В табл. 2 приведены периоды и амплитуды выделенных данным методом периодических составляющих и их повторяемость по данным МС Нарын за 110 лет. Выделенные периоды соответствуют фазам максимума амплитуды. Курсивом отмечены годы предполагаемых максимумов в будущем.

Ошибка определения амплитуды для уровня доверительной вероятности $P \geq 0,95$ для среднегодовых значений составляет $\pm 0,16$ °С, а для холодного полугодия – $\pm 0,3$ °С. В табл. 2 для холодного периода приведены выделенные те составляющие, амплитуды которых превышают 0,5 °С.

Для долгосрочного прогноза температуры (среднегодовых и за холодное полугодие) можно взять 4–6 диапазонов периодов: 8,0–8,5; 11–12; 20–22; 35–36; 50–55; 90–95 лет. На основе этих значимых периодичностей можно составить долгосрочный прогноз изменения среднегодовых и среднесезонных температур для холодного полугодия. Полученные долгопериодные составляющие отражают реальные процессы, протекающие в атмосфере, и могут быть положены в основу эмпирического моделирования температурного режима нижней атмосферы [5, 6].

Эти результаты свидетельствуют о реальной связи вариаций температуры с вариациями солнечной активности над средне- и высокогорьем Кыргызстана, расположенного в центральной части Центральноазиатского региона.

На основе имеющихся данных о частотном спектре долгопериодных вариаций приземной температуры можно смоделировать вероятные изменения температуры с учетом 22, 35, 50 и 90-летней составляющей.

Таблица 2. Результаты Фурье-анализа многолетних температурных рядов по данным МС Нарын: периоды и амплитуды периодических составляющих

Среднегодовые температуры									
Период, годы	8,0-8,5	11-12	16-18	20-22	23-25	28-30	35-36	50-52	90-95
Амплитуда, °С	0,50	0,55	0,42	0,53	0,37	0,40	0,45	0,37	0,87
Годы максимума амплитуды			1990 2005	2000 2020	1990 2015	1970 2002	1970 2005	1965 2015	1992 2085
Средние температуры за холодное полугодие									
Период, годы	8,0-8,5	11-12	16-18	20-22	23-25	28-30	35-36	50-52	90-95
Амплитуда, °С	0,86	0,50	0,69	0,69	0,91	0,61	0,65	0,78	1,43
Годы максимума амплитуды	2001 2009	1998 2010	2005 2020	2005 2025	1987 2012	2003 2032	2002 2038	1995 2045	1993 2088

Заключение

Проведенные исследования показали возможность использования вейвлет-преобразования в качестве инструмента для анализа многолетних рядов данных температуры атмосферы и океана в целях выделения практически значимых частотных и временных компонентов для последующего анализа.

Методом спектрального анализа временных рядов получены периодические составляющие многолетних вариаций температуры по метеостанциям Бишкек, Нарын и Тянь-Шань за период с 1930 по 2008 год.

На верхних уровнях нижней атмосферы наиболее четко выделена составляющая с периодом в 11 лет, связанная с 11-летним циклом солнечной активности. Особенностью частотного спектра температурных вариаций на верхних уровнях нижней атмосферы является ярко выраженная 34–38-летняя составляющая.

В приземном слое атмосферы выделены сезонные (годовые) и квазидвухлетние составляющие. В нижних слоях атмосферы выделена квазидвадцатилетняя составляющая, которая связана с основным 22-летним солнечным циклом. Выделенные периодические составляющие связаны с солнечной активностью и реально существующими долгопериодными процессами, протекающими в атмосфере.

Полученные данные свидетельствуют о связи температурного режима нижней атмосферы с циклами солнечной активности и могут быть использованы в долгосрочном прогнозе температурного режима атмосферы над Кыргызстаном и Центральноазиатским регионом.

Поступила в редакцию 10.10.2017 г.

Список использованных источников

1. *Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д.* Изменения регионального климата, обусловленные природными и антропогенными факторами // *Экология Кыргызстана: проблемы, прогнозы, рекомендации* / под ред. проф. К.А. Каримова. Бишкек: Илим, 2000. С. 66-81.
2. *Цветков А.В.* Результаты анализа данных градиента потенциала методом максимальной энтропии // *Труды ГГО*. 1981. Вып. 458. С. 43-48.
3. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеров применения // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145-1170.
4. *Гармаев Б.З.* Вейвлет-анализ локальной структуры пульсовых сигналов: автореферат дис. ... канд. ф.-мат. наук: 01.04.03. ИГУ, Иркутск, 2013.
5. *Karimov K.A., Gainutdinova R.D.* Impact of solar activity on regional climate change in mountainous conditions of Central Asia // *Proceedings of International Conference «Influence of global climate change on the ecosystem of arid and high mountain zone in CA»*. Dushanbe, Tajikistan, 2012. P. 70-73.
6. *Karimov K.A., Gainutdinova R.D.* Regional climate change in Kyrgyzstan: Impact of natural and anthropogenic factors // *Proceedings of NATO ARW on Climate Change and its Effects on Water Resources / Issues of National and Global Security*. The Netherlands, Springer Science+BusinessMedia, 2011. P. 131-137.

SUMMARIES

The peculiarities of frequency spectra of long-term changes of surface temperature and parameters of solar activity in the Kyrgyz Republic region / Gainutdinova R.D., Krymskaya D.N. // *Proceedings of Hydrometcentre of Russia*. 2017. Vol. 366. P. 112-120.

The possibilities of using wavelet analysis as an instrument for analyzing long-term data on atmospheric temperature and solar activity in the Kyrgyz Republic to define physically meaningful frequency and time components for further analysis are discussed.

Keywords: atmosphere, temperature, solar activity, climate, spectral analysis.