



ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.58

ОЦЕНКА ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКЦИИ ЗЕМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ВНЕШНЕЕ РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

М. Б. Богданов

Саратовский государственный университет
E-mail: BogdanovMB@info.sgu.ru

Земная климатическая система (ЗКС) рассматривается как линейная система, выходом которой являются аномалии глобальной приповерхностной температуры $\Delta T(t)$. На вход системы, наряду с изменением солнечной постоянной $\Delta I(t)$, могут воздействовать и другие факторы, а на выход – собственные колебания температуры ЗКС и случайный шум. Проведенный спектральный анализ рядов $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ показывает существование между ними статистически значимой когерентности. При рассмотрении $\Delta I(t)$ как зондирующего сигнала получена оценка амплитудно-частотной характеристики $A(f)$ ЗКС. Результаты согласуются с полученной ранее оценкой импульсной передаточной характеристики ЗКС, давшей для эквивалентной постоянной времени системы значение 1.04 ± 0.17 мес.

Ключевые слова: земная климатическая система, радиационное воздействие, частотная характеристика, постоянная времени.

Estimation of Frequency Response of Earth's Climate System to External Radiative Forcing

M. B. Bogdanov

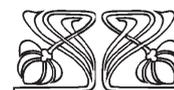
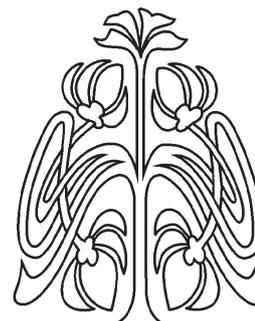
We consider the Earth's climate system (ECS) as a linear system whose output is the global mean temperature anomaly $\Delta T(t)$. The input the system, along with changes in the solar constant $\Delta I(t)$, can be affected by other factors, and at the output manifest themselves own temperature fluctuations and a random noise. The spectral analysis of the data shows the existence of statistically significant coherence between $\Delta I(t)$ and $\Delta T(t)$. An estimate of the amplitude-frequency response $A(f)$ of the ECS is obtained, assuming that $\Delta I(t)$ plays the role of a probing signal. The results agree with the previously obtained impulse response of the ESC, which gave the equivalent time constant value of 1.04 ± 0.17 month.

Key words: Earth's climate system, radiative forcing, frequency response, time constant.

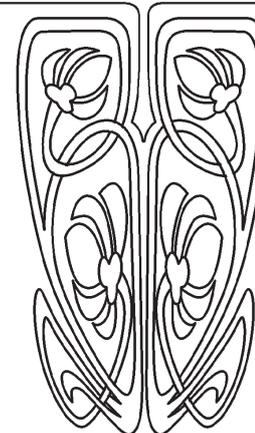
Введение

Исследование времени реакции и чувствительности земной климатической системы (ЗКС) к внешнему радиационному воздействию в последнее время привлекает к себе большое внимание в связи с изучением проблемы глобального изменения климата [1]. При этом ЗКС рассматривается как динамическая система, испытывающая воздействие ряда факторов, одним из которых является связанное с солнечной активностью изменение глобальной инсоляции. Исследовались возможности использования этого фактора для оценки характеристик ЗКС как на больших интервалах времени на основе реконструированных данных о солнечной активности [2, 3], так и в последние три десятилетия с привлечением результатов заатмосферных измерений вариации солнечной постоянной $\Delta I(t)$ [4, 5]. Другой подход к оценке свойств ЗКС основывался на анализе ее выходного сигнала – аномалий глобально усредненных среднемесячных значений приповерхностной температуры $\Delta T(t)$ [6–9].

Основной трудностью, с которой приходится сталкиваться при оценке отклика ЗКС на изменение инсоляции, является наличие допол-



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





нительных факторов, оказывающих воздействие на глобальную температуру. Влияние этих факторов может иметь как случайный (флуктуации концентрации вулканического аэрозоля), так и циклический характер (явление Эль-Ниньо, квазидвухлетний цикл).

Ранее нами была предложена методика восстановления импульсной передаточной характеристики ЗКС $h(t)$, основанная на решении обратной задачи для интегрального уравнения, связывающего $\Delta T(t)$ с $\Delta I(t)$ [10]. При этом суммарное воздействие всех других факторов, влияющих на глобальную температуру, рассматривалось как случайный шум. Возможность получения устойчивого решения данной некорректно поставленной обратной задачи обеспечивалась выбором специального множества функций, на котором проводился его поиск. Это компактное множество выпуклых вниз неотрицательных функций. Наложённое ограничение предполагает, что ЗКС может быть динамической системой первого порядка или совокупностью таких параллельно действующих систем (атмосфера, суша, океан) с разными постоянными времени. Результаты восстановления $h(t)$ на интервалах времени длиной до 100 мес. показали, что она представляет собой быстро убывающую функцию, практически не отличающуюся от нуля для $t > 3$ мес. Среднее значение эквивалентной постоянной времени оказалось равным 1.04 ± 0.17 мес.

Целью настоящей работы является оценка частотной характеристики ЗКС $H(f)$ в области высоких частот f . Следует отметить, что характеристики $H(f)$ и $h(t)$ связаны преобразованием Фурье и не являются независимыми. Однако они могут быть получены из анализа наблюдательных данных разными методами, с использованием различной априорной информации. Для решения задачи мы применяем классический цифровой спектральный анализ временных рядов, предполагая, что изменение солнечной постоянной $\Delta I(t)$ играет роль зондирующего сигнала, а все другие факторы, влияющие на выходной сигнал $\Delta T(t)$, включая и погрешности наблюдений, статистически независимы от зондирующего сигнала так, что их взаимные спектры равны нулю. Данный подход является альтернативой предыдущему и позволяет получить информацию о скорости реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие. При этом никаких ограничений на возможный вид частотной характеристики ЗКС не накладывается.

Методика оценки частотной характеристики

Для получения информации о связи временных рядов $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ можно использовать хорошо разработанную методику цифрового спектрального анализа [11–13]. В этом случае статистическая взаимосвязь двух рядов на частоте f оценивается с помощью функции когерент-

ности $K_{I,T}(f)$, квадрат которой определяется выражением

$$K_{I,T}^2(f) = \frac{|S_{I,T}(f)|^2}{S_{I,I}(f)S_{T,T}(f)}, \quad (1)$$

где $S_{I,T}(f)$ – взаимный спектр рядов изменения солнечной постоянной и аномалий температуры, $S_{I,I}(f)$ – спектр мощности ряда изменения солнечной постоянной, а $S_{T,T}(f)$ – спектр мощности ряда аномалий температуры. Длина доверительного интервала оценки $K_{I,T}(f)$ зависит от частоты. Поэтому для выяснения степени достоверности когерентности обычно применяют преобразование Фишера [11]

$$Y(f) = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + |K_{I,T}(f)|}{1 - |K_{I,T}(f)|}, \quad (2)$$

выравнивающее дисперсию и дающее доверительный интервал фиксированной длины.

При наличии когерентности временных рядов можно поставить задачу оценки частотной характеристики $H(f)$, рассматривая ЗКС как инвариантную во времени линейную динамическую систему с входным сигналом $\Delta I(t)$ и выходным – $\Delta T(t)$. Следует отметить, что при воздействии факторов солнечной активности на ЗКС в принципе нельзя исключить возможности проявления нелинейных эффектов [14]. Однако диапазон изменения $\Delta I(t)$ достаточно мал. В этом случае предположение линейности системы вполне допустимо и может рассматриваться как первое приближение. Кроме того, специальные исследования связи $\Delta I(t)$ с $\Delta T(t)$ не выявили наличия нелинейности [3].

Для оценки частотной характеристики мы применили метод зондирующего сигнала [12], в качестве которого использован временной ряд изменения солнечной постоянной $\Delta I(t)$. При этом на вход системы могут поступать и другие сигналы, дисперсия которых может даже превосходить дисперсию зондирующего сигнала. На выходной сигнал $\Delta T(t)$ также могут накладываться собственные колебания температуры ЗКС и случайный шум, к которому относят и возможные проявления нелинейности. Если все другие сигналы и шум статистически независимы от зондирующего сигнала и их взаимные спектры равны нулю, то частотная характеристика системы $H(f)$ может быть найдена из выражения

$$H(f) = \frac{S_{I,T}(f)}{S_{I,I}(f)}. \quad (3)$$

Равенство (3) является точным для спектров, полученных по реализациям бесконечной длины, но приближенно выполняется и для сглаженных оценок спектров по конечным реализациям [11].

В общем случае частотная характеристика системы $H(f)$ является комплексной функцией, представимой в виде



$$H(f) = A(f) \exp[iF(f)], \quad (4)$$

где $A(f)$ – амплитудно-частотная характеристика, а $F(f)$ – фазово-частотная характеристика. Эти две характеристики представляют собой действительные функции частоты и имеют ясный физический смысл. Первая из них определяет, как изменяется амплитуда синусоидального сигнала частоты f при прохождении через систему, а вторая – запаздывание его фазы.

Наблюдательные данные

Как и ранее при изучении импульсной передаточной характеристики ЗКС [10], для анализа ее частотной характеристики мы использовали среднемесячные значения композитного ряда измерений величины солнечной постоянной PMOD TSI с января 1976 по май 2009 г. [15] (ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/DataPlots/composite_d41_62_0910.dat). Полное число отсчетов составляет $N=401$. Зондирующий сигнал ЗКС $\Delta I(t)$, полученный вычитанием из данного ряда среднего значения 1365.9175 Вт/м^2 , приведен на рис. 1, а.

В качестве исходных данных для расчета выходного сигнала ЗКС был взят ряд аномалий глобально усредненных среднемесячных значений приповерхностной температуры (суша + океан) ERSSTv3b [16] за тот же интервал времени (ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/ersstv3b/pdo/aravg.mon.land_ocean.90S.90N.asc). Из ряда был вычтен линейный тренд, а также синусоида с годичным периодом и ее две первые гармоники. Параметры тренда, амплитуды и начальные фазы синусоид оценивались способом наименьших квадратов. Полученные значения приведены в работе [10]. Аномалии глобальной температуры $\Delta T(t)$ с вычтенными линейным трендом и сезонными гармониками показаны на рис. 1, б.

Результаты анализа

При расчете спектров мощности и взаимного спектра наблюдательных данных нами применялась методика, подробно описанная в руководстве [11]. График преобразования Фишера $Y(f)$ функции когерентности, полученный с использованием выражений (1) и (2), приведен на рис. 2, на котором горизонтальным отрезком показана ширина полосы частот спектрального окна Ханна $\Delta f = 0.0261 \text{ мес.}^{-1}$, характеризующая разрешающую способность по частоте. Число степеней свободы сглаженных оценок спектров равно $n = 21$. Штриховой линией на рис. 2 показана верхняя граница 90%-ного доверительного интервала для математического ожидания, центр которого находится на оси абсцисс. Как видно на рис. 2, на низких частотах и в диапазоне высоких частот существуют области, в которых когерентность статистически значимо отличается от нуля.

Рассчитанная с использованием выражений (3) и (4) амплитудно-частотная характеристика ЗКС $A(f)$ приведена на рис. 3, на котором горизонтальным отрезком также показана ширина спектрального окна Δf . Вертикальный отрезок дает длину 90%-ного доверительного интервала для частоты, соответствующей максимальной когерентности.

Как видно на рис. 3, амплитудно-частотная характеристика ЗКС оказывается достаточно ровной и отличной от нуля вплоть до максимальной, достигаемой при месячных интервалах отсчета исходных рядов, частоты Найквиста $f_N = 0.5 \text{ мес.}^{-1}$. Наблюдаемые изменения $A(f)$ могут быть объяснены погрешностью оценки. Тем не менее нельзя не отметить наличия резонансного пика на частоте 0.0326 мес.^{-1} . Если принять, что погрешность измерения частоты в нашем спектральном анализе составляет величину равную $\Delta f / 2$, то период, соответствующий максимуму этого пика, оказывается равным 2.6 ± 1.0 года и в пределах погрешности совпадает со средней продолжительностью квазидвухлетнего цикла [17]. В области этого пика когерентность статистически значимо отличается от нуля, но оказывается довольно малой, что видно на рис. 2. К сожалению, длина анализируемых рядов недостаточна для получения уверенных выводов о реальности данного резонанса.

Обсуждение результатов

Длина исходных временных рядов $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ сравнительно невелика. Поэтому имеет смысл рассмотреть поведение $A(f)$ только в области высоких частот. В этой области результаты анализа представляются достаточно надежными и могут быть сопоставлены с независимыми данными об импульсной передаточной характеристике ЗКС $h(t)$ [10].

Штриховой линией на рис. 3 схематически показана амплитудно-частотная характеристика линейной системы первого порядка с $\tau = 1.04 \text{ мес.}$, равной нашей оценке эквивалентной постоянной времени ЗКС. Разумеется, ожидать полного совпадения этой характеристики с нашей оценкой $A(f)$ нельзя. Это связано как с влиянием погрешностей, так и с тем, что полученная функция $h(t)$ не является спадающей экспонентой. Тем не менее можно говорить о качественном соответствии результатов. В целом в области высоких частот чувствительность ЗКС к внешнему радиационному воздействию оказывается несколько выше, чем у линейной системы первого порядка с постоянной времени около одного месяца.

Следует отметить, что характеристики ЗКС $h(t)$ и $A(f)$ получены при использовании различной априорной информации об их возможном поведении и разных предположениях о характере воздействия других факторов, влияющих на аномалии глобальной температуры. В методе зондирующего сигнала, применяемого в данной

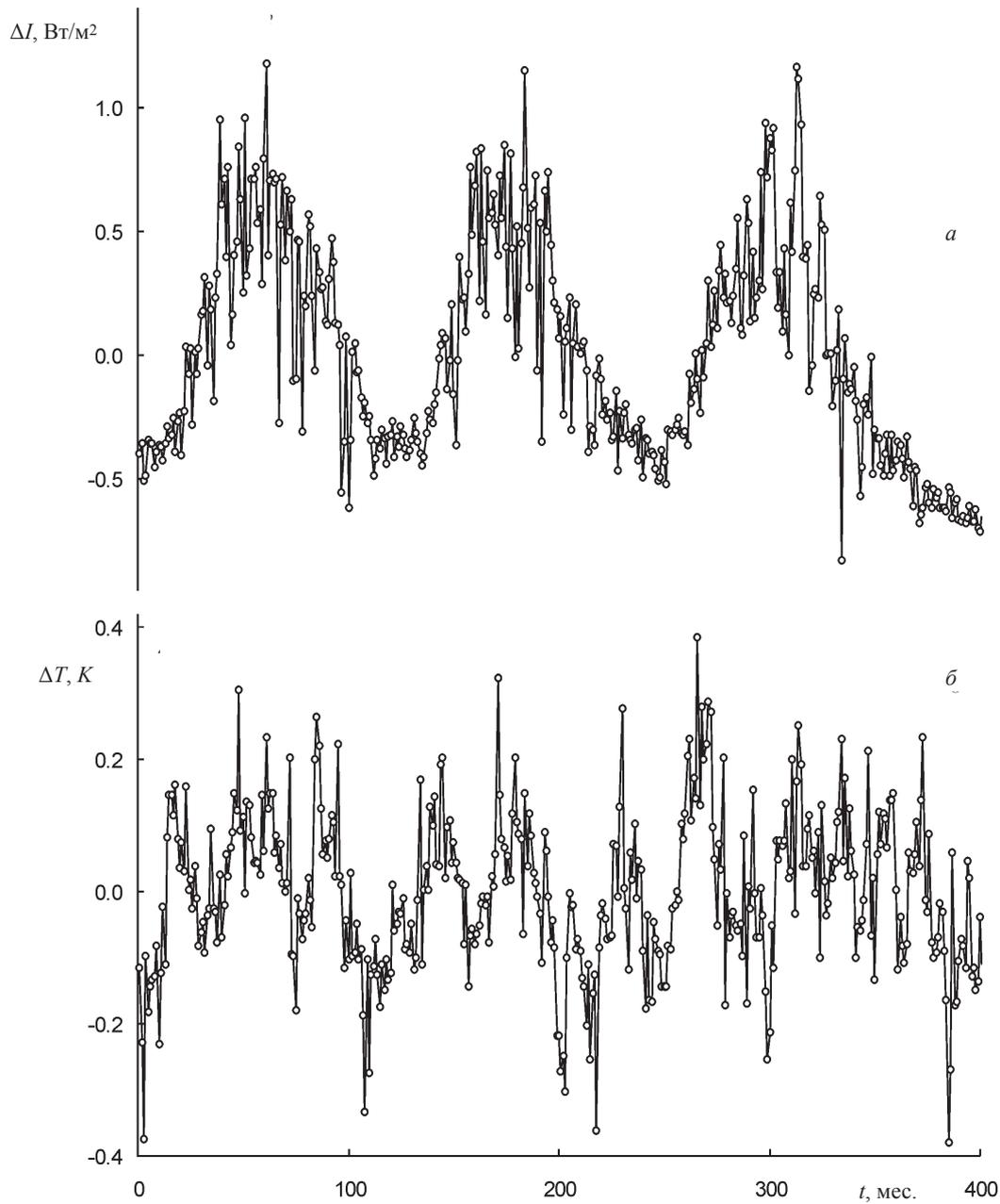


Рис. 1. Среднемесячные значения изменения солнечной постоянной (а) и аномалий глобально усредненной приповерхностной температуры (б)

работе, никаких ограничений на $A(f)$ не накладывается, а все остальные факторы предполагаются независимыми от зондирующего сигнала $\Delta I(t)$. Это предположение может быть проверено путем анализа спектра мощности остаточного шума выходного сигнала $S_{ZZ}(f)$ [11]:

$$S_{ZZ}(f) = S_{TT}(f) [1 - K_{IT}^2(f)]. \quad (5)$$

Рассчитанный спектр $S_{ZZ}(f)$ в области высоких частот $f > 0,1 \text{ мес.}^{-1}$ не содержит каких-либо пиков и статистически значимо не отличается от

спектра мощности белого шума, что подтверждает возможность применения методики.

Шварц (Schwartz) [9] отметил невозможность описания ЗКС одной линейной динамической системой первого порядка и привел пример электрической схемы, моделирующей ее поведение. Схема включает две слабо связанные RC-цепочки, состоящие из резистора R и конденсатора C , с постоянными времени τ_1 и τ_2 , причем $\tau_1 \ll \tau_2$. Скорость реакции такой системы на внешнее воздействие определяется малой величиной τ_1 , а

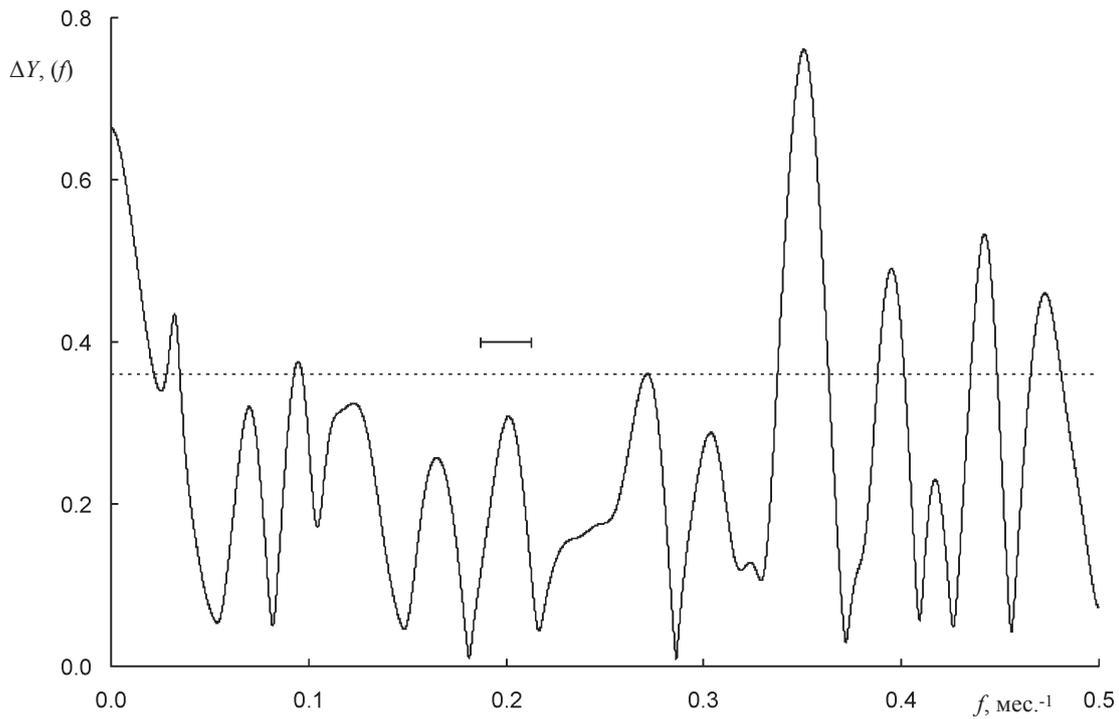


Рис. 2. Преобразование Фишера функции когерентности временных рядов изменения солнечной постоянной и аномалий глобально усредненной приповерхностной температуры

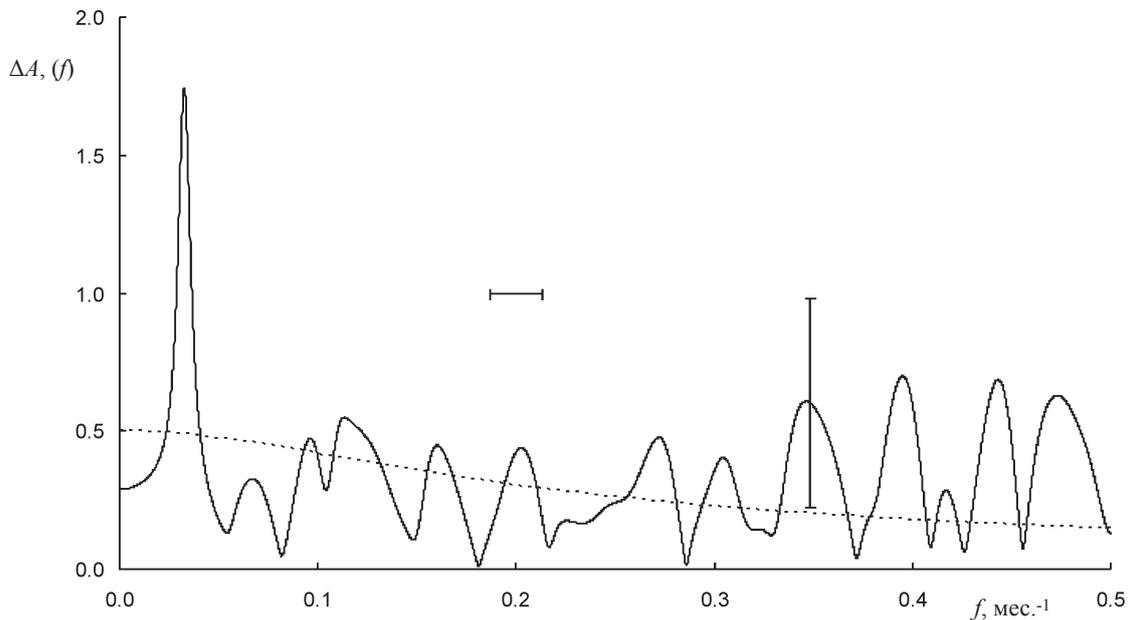


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика реакции земной климатической системы на внешнее радиационное воздействие

время установления – τ_2 . С использованием этой аналогии можно считать, что полученные нами характеристики $h(t)$ и $A(f)$ описывают только скорость реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие. Она определяется атмосферными процессами и имеет характерное время отклика

около месяца. В случае ЗКС величина τ_2 должна быть порядка тысячи лет, что обусловлено большой тепловой инерцией глубинных вод океана. Поэтому о времени установления системы, которое должно многократно превышать продолжительность анализируемых рядов, мы ничего не можем сказать.



Выводы

В результате выполнения настоящей работы получена оценка амплитудно-частотной характеристики ЗКС $A(f)$ в области высоких частот. При решении задачи использовался цифровой спектральный анализ. Предполагалось, что изменение солнечной постоянной $\Delta I(t)$ играет роль зондирующего сигнала, а все другие факторы, влияющие на выходной сигнал системы (аномалии глобальной температуры $\Delta T(t)$, включая и погрешности наблюдений), не зависят от зондирующего сигнала. При этом не накладывается никаких ограничений на возможный вид $A(f)$. В целом амплитудно-частотная характеристика ЗКС оказывается достаточно ровной и отличной от нуля вплоть до частоты Найквиста 0.5 мес.⁻¹

Единственный резонансный пик, статистическая значимость которого невысока, наблюдается на частоте, в пределах погрешности совпадающей со средней частотой квазидвухлетнего цикла (QVO). Данный цикл, первоначально обнаруженный по изменениям скорости ветра в экваториальной стратосфере, проявляется в изменении многих характеристик атмосферы, в том числе и приповерхностной температуры [17]. Возможно, что квазидвухлетний цикл связан с резонансной частотой ЗКС. Однако для подтверждения существования такого резонанса необходимо анализировать более продолжительные ряды наблюдений.

Результаты анализа частотной характеристики ЗКС согласуются с полученной нами ранее независимой оценкой импульсной передаточной характеристики $h(t)$ [10], давшей для ее эквивалентной постоянной времени значение $\tau = 1.04 \pm 0.17$ мес. Поведение $A(f)$ в области высоких частот подтверждает высокую скорость реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие. Подчеркнем, что речь идет именно о скорости реакции ЗКС, так как о времени установления системы, которое должно многократно превышать продолжительность анализируемых рядов, мы ничего не можем сказать.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части (код проекта 2179).

Библиографический список

1. Climate change 2013 : The physical science basis. Cambridge : Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
2. Мохов И. И., Безверхний В. А., Елисеев А. В., Карпенко А. А. Взаимосвязь изменений глобальной приповерхностной температуры с изменениями солнечной активности по данным наблюдений и реконструкций для XVII–XX веков и по модельным расчетам // Докл. РАН. 2006. Т. 409, № 1. С. 115–119.
3. Мохов И. И., Смирнов Д. А. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и изменений глобальной приповерхностной температуры Земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 3. С. 283–293.
4. Douglass D. H., Clader B. D., Knox R. S. Climate sensitivity of Earth to solar irradiance : update // Paper presented at 2004 Solar radiation and climate (SORCE) meeting on decade variability in the Sun and the climate, Meredith, New Hampshire, 27–29 October 2004. P. 1–16. URL: <http://arxiv.org/abs/physics/0411002> (дата обращения: 12.09.2014).
5. Lockwood M. Recent changes in solar outputs and the global mean surface temperature. III. Analysis of contributions to global mean air surface temperature rise // Proc. Royal Soc. A. 2008. Vol. 464. P. 1387–1404.
6. Schwartz S. E. Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. D24S05. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD008746> (дата обращения: 12.09.2014).
7. Scafetta N. Comment on «Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system» by S. E. Schwartz // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. D15104. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD009586> (дата обращения: 12.09.2014).
8. Scafetta N. Empirical analysis of the solar contribution to global mean air surface temperature change // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. Vol. 71. P. 1916–1923.
9. Schwartz S. E. Reply to comments by G. Foster et al., R. Knutti et al., and N. Scafetta on “Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system” // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. D15105. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD009872> (дата обращения: 12.09.2014).
10. Bogdanov M. B., Efremova T. Yu., Katrushchenko A. V. Estimation of impulse response of Earth's climate system at short time intervals // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. Vol. 86. P. 51–55.
11. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения : в 2 вып. М. : Мир, 1972. Вып. 2. 288 с.
12. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М. : Мир, 1983. 312 с.
13. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М. : Мир, 1990. 584 с.
14. Огурцов М. Г., Распопов О. М., Ойнонен М., Юнгнер Х., Линдхольм М. Возможное проявление нелинейных эффектов при воздействии солнечной активности на климатические изменения // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50, № 1. С. 17–22.
15. Fröhlich C. Solar irradiance variability since 1978 : Revision of the PMOD composite during solar cycle 21 // Space Science Rev. 2006. Vol. 125. P. 53–65.
16. Smith T. M., Reynolds R. W., Peterson T. C., Lawrimore J. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006) // J. Climate. 2008. Vol. 21. P. 2283–2296.
17. Хайруллина Г. Р., Астафьева Н. М. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Препринт Института космических исследований РАН. 2163. М., 2011. 60 с.