



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 83–87
Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 83–87
<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-83-87>

Научная статья
УДК 551.58



Оценка частотной характеристики реакции глобальной температуры на изменение радиационного воздействия

М. Б. Богданов, М. Ю. Червяков[✉]

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Богданов Михаил Борисович, доктор физико-математических наук, инженер, BogdanovMB@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5305-8925>

Червяков Максим Юрьевич, кандидат географических наук, заведующий кафедрой, chervyakovmu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7641-3392>

Аннотация. Земная климатическая система (ЗКС) рассматривается как линейная система, входом которой является изменение солнечной постоянной $\Delta I(t)$, а выходом – аномалия глобально осредненной приповерхностной температуры $\Delta T(t)$. На вход системы могут воздействовать и другие факторы, а на выходе проявлять себя собственные колебания температуры ЗКС и случайный шум, однако все они полагаются независимыми от $\Delta I(t)$. Спектральный анализ среднемесячных значений $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ показывает наличие статистически значимой когерентности. Оцененная амплитудно-частотная характеристика $A(f)$ ЗКС отлична от нуля вплоть до частоты Найквиста 0.5 мес^{-1} . Результаты согласуются с полученной ранее оценкой эквивалентной постоянной времени ЗКС $1.31 \pm 0.03 \text{ мес}$.

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

Для цитирования: Богданов М. Б., Червяков М. Ю. Оценка частотной характеристики реакции глобальной температуры на изменение радиационного воздействия // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 83–87. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-83-87>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Estimation of frequency response of the global temperature to change in radiative forcing

М. В. Bogdanov, M. Yu. Cherviakov[✉]

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Mikhail B. Bogdanov, BogdanovMB@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5305-8925>

Maksim Yu. Cherviakov, chervyakovmu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7641-3392>

Abstract. The Earth's climate system (ECS) is considered as a linear system whose input is a change in the solar constant $\Delta I(t)$ and the output is an anomaly of the globally averaged surface temperature $\Delta T(t)$. The system input can be affected by other factors, and at the output their own temperature fluctuations and a random noise manifest themselves. All these factors are assumed to be independent of $\Delta I(t)$. The spectral analysis of monthly mean values of $\Delta I(t)$ and $\Delta T(t)$ shows the existence of statistically significant coherence. The amplitude-frequency response $A(f)$ of the ECS is different from zero up to the Nyquist's frequency 0.5 month^{-1} . The results are consistent with the previously obtained estimate of the equivalent time constant of the ESC $1.31 \pm 0.03 \text{ month}$.

Keywords: Earth's climate system, radiative forcing, frequency response, time constant

For citation: Bogdanov M. B., Cherviakov M. Yu. Estimation of frequency response of the global temperature to change in radiative forcing. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 83–87 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-83-87>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В настоящее время изучение проблемы глобального изменения климата основывается на расчетах сложных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) [1]. Для контроля этих моделей представляют большой интерес независимые оценки характеристик земной кли-

матической системы (ЗКС), описывающих связь аномалии глобально осредненных значений приповерхностной температуры $\Delta T(t)$ с изменением внешнего радиационного воздействия на верхней границе атмосферы (ВГА) [2]. Простые модели, используемые для таких оценок, часто называются нуль-мерными. Обзор результатов,



полученных с их применением, можно найти в публикациях [3–5].

В работах [4, 5] было предложено рассматривать ЗКС как инвариантную во времени линейную динамическую систему, входом которой является изменение радиационного воздействия, вызванное вариацией солнечной постоянной $\Delta I(t)$, а выходом – аномалия $\Delta T(t)$. При этом суммарное воздействие всех других факторов, способных повлиять на глобально осредненную температуру, рассматривалось как случайный шум. Известно, что поведение подобных линейных систем может быть описано как во временной области (с использованием импульсной передаточной характеристики или функции Грина $h(t)$), так и в частотной области (с использованием частотной характеристики $H(f)$). Данные характеристики взаимосвязаны. В частотности $H(f)$ является преобразованием Фурье функции $h(t)$. Но важно отметить, что при анализе линейных систем эти характеристики могут быть получены независимыми методами.

В работах [4–6] применялась методика восстановления импульсной передаточной характеристики $h(t)$ путем решения обратной некорректно поставленной задачи для интегрального уравнения свертки, связывающего вход и выход ЗКС. Поиск решения проводился на компактном множестве монотонно невозрастающих выпуклых вниз неотрицательных функций. Это предполагает, что ЗКС является системой первого порядка или состоит из нескольких параллельно включенных независимых систем первого порядка с разными значениями постоянной времени τ , описывающих влияние атмосферы, суши и океана. В результате восстановления были получены оценки $h(t)$ и проанализированы другие свойства ЗКС на интервалах времени до 100 мес.

Целью настоящей статьи является оценка частотной характеристики ЗКС $H(f)$ в области высоких частот. Для решения задачи мы используем 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 измерений, не зависят от зондирующего сигнала. Данный подход независим от предыдущего и позволяет получить информацию о скорости реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие. При этом не накладывается никаких ограничений на вид частотной характеристики и возможный порядок системы.

Методика оценки частотной характеристики

Как известно, сигналы на входе $\Delta I(t)$ и выходе $\Delta T(t)$ инвариантны во времени линейной динамической системы связаны интегральным

уравнением типа свертки

$$\Delta T(t) = h(t) * \Delta I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \xi) \Delta I(\xi) d\xi, \quad (1)$$

где $h(t)$ – импульсная передаточная характеристика или функция Грина системы. Введя в рассмотрение частотную характеристику системы $H(f)$, являющуюся преобразованием Фурье функции $h(t)$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi f t} dt,$$

а также преобразования Фурье входного $\Delta I(f)$ и выходного $\Delta T(f)$ сигналов, из уравнения (1) можно получить

$$\Delta T(f) = H(f) \Delta I(f).$$

Частотную характеристику системы $H(f)$, в общем случае являющуюся комплексной функцией частоты f , обычно записывают в виде

$$H(f) = A(f) e^{iF(f)},$$

где $A(f)$ – амплитудно-частотная характеристика, а $F(f)$ – фазово-частотная характеристика системы, представляющие собой действительные функции. Эти характеристики имеют ясный физический смысл: $A(f)$ показывает, как изменяется амплитуда синусоидального сигнала при прохождении через систему, а $F(f)$ определяет величину его запаздывания.

Предположим, что сигналы на входе $\Delta I(t)$ и выходе $\Delta T(t)$ системы являются реализациями стационарных и эргодических временных рядов, для которых могут быть определены автокорреляционные функции $R_{I,I}(\tau)$ и $R_{T,T}(\tau)$, взаимная корреляционная функция $R_{I,T}(\tau)$, а также связанные с ними преобразованиями Фурье спектры мощности $S_{I,I}(f)$ и $S_{T,T}(f)$ и взаимный спектр мощности $S_{I,T}(f)$.

Для оценки частотных характеристик $H(f)$ линейных систем часто используется методика зондирующего сигнала [7]. Она предполагает, что в общем случае на систему наряду с $\Delta I(t)$ могут воздействовать и другие сигналы, а также случайный шум. В случае ЗКС на глобальную температуру могут оказывать влияние факторы, имеющие как случайный (флуктуации концентрации вулканического аэрозоля), так и циклический характер (явление Эль-Ниньо, квазидвухлетний цикл), а в роли шума выступают погрешности измерений. Но поскольку эти воздействия не зависят от зондирующего сигнала $\Delta I(t)$ и их взаимные спектры мощности равны нулю, то частотная характеристика системы может быть найдена как

$$H(f) = S_{I,T}(f) / S_{I,I}(f). \quad (2)$$



На практике всегда приходится иметь дело с реализациями временных рядов конечной продолжительности, что приводит к необходимости рассмотрения сглаженных оценок соответствующих спектров мощности. Тем не менее выражение (2) остается справедливым и для сглаженных оценок [8].

Наблюдательные данные

С целью сравнения с результатами анализа характеристик ЗКС, полученных во временной области, для $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ нами использовались те же значения, что и в работе [5]. В ней же приведены адреса серверов сети Интернет, с которых брались исходные данные, описана их первичная обработка и даны графики временных рядов.

Для солнечной постоянной использовались среднемесячные значения композитного ряда PMOD TSI, измеренные в новой шкале эксперимента VIRGO [9]. Изменения $\Delta I(t)$ получались вычитанием среднего значения солнечной постоянной $1360.8782 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. Первый отсчет $\Delta I(t)$ соответствует ноябрю 1978 г., последний – маю 2018 г. Полное число отсчетов $N = 475$.

Для среднемесячных значений аномалии глобально осредненной приповерхностной температуры за тот же интервал времени был взят ряд NOAA GST (версия 4.0) [10, 11] с вычтенным линейным трендом. Как было показано в работе [5], полученные значения $\Delta T(t)$ не проявляют статистически значимых сезонных изменений и поэтому фильтрация соответствующих гармоник не проводилась.

Результаты анализа

Прежде всего нами была рассчитана взаимная корреляционная функция $R_{I,T}(\tau)$ временных рядов $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ на интервале изменения запаздывания аномалий температуры $-50 \leq \tau \leq 50$ мес. Результаты расчетов представлены на рис. 1, на котором горизонтальными штриховыми линиями проведены границы 90%-го доверительного интервала, центр которого лежит на оси абсцисс. Как видно из рисунка, при малых по модулю значениях запаздывания функция $R_{I,T}(\tau)$ статистически значимо отличается от нуля. Полная длина интервала задания $R_{I,T}(\tau)$ не превышает четверти длины исходных временных рядов. Такое же ограничение длины интервала, на котором проводился поиск импульсной передаточной характеристики ЗКС, мы использовали ранее при восстановлении $h(t)$ [5].

Выбранная длина интервала задания $R_{I,T}(\tau)$ обеспечивает при использовании корреляционного окна Хана ширину спектрального окна $\Delta f = 0.0261 \text{ мес}^{-1}$ и число степеней свободы сглаженной оценки взаимного спектра мощности $S_{I,T}(f)$ $n = 25$ [8]. Такая же максимальная величина запаздывания τ использовалась при расчете автокорреляционных функций $R_{I,I}(\tau)$ и $R_{T,T}(\tau)$,

путем преобразования Фурье которых с применением корреляционного окна Хана были рассчитаны оценки спектров мощности $S_{I,I}(f)$ и $S_{T,T}(f)$. Поэтому для данных спектров мы имеем те же самые значения Δf и n .

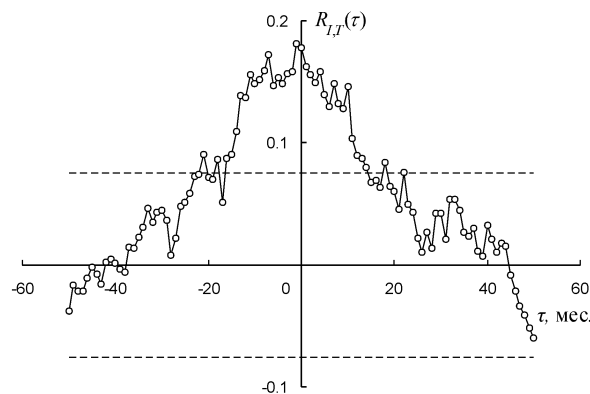


Рис. 1. Взаимная корреляционная функция $R_{I,T}(\tau)$ временных рядов $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$, зависящая от запаздывания аномалий температуры τ . Горизонтальными штриховыми линиями проведены границы 90%-го доверительного интервала, центр которого расположен на оси абсцисс

Частотная характеристика $H(f)$ ЗКС была получена из отношения спектров (2). Знание $H(f)$ позволяет рассчитать амплитудно-частотную характеристику ЗКС $A(f)$. Оценки доверительных интервалов для $A(f)$ могут быть получены только приближенно [8]. При этом величина интервала оказывается зависящей как от частоты, так и от квадрата функции когерентности

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

которая сама по себе имеет большой интерес, характеризуя взаимосвязь исходных рядов на частоте f .

Доверительные интервалы для $K_{I,T}^2(f)$ также зависят от частоты. Поэтому для оценки степени статистической значимости когерентности анализируемых временных рядов применяют преобразование Фишера [8]

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

выравнивающее дисперсию и дающее доверительный интервал фиксированной длины. График функции $Y_{I,T}(f)$ приведен на рис. 2, на котором горизонтальным отрезком показана ширина полосы частот спектрального окна Δf , характеризующая разрешающую способность по частоте. Штриховой линией на рис. 2 проведена верхняя граница 90%-го доверительного интервала, центр которого находится на оси абсцисс. Как видно на рис. 2, вблизи частоты 0.1 мес^{-1} и в диапазоне высоких частот существуют области, в которых когерентность статистически значимо отличается от нуля.

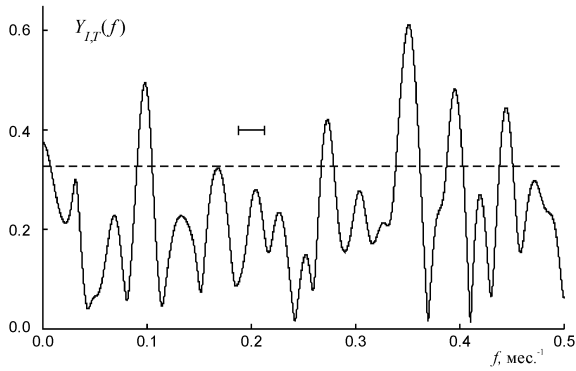


Рис. 2. Преобразование Фишера функции когерентности временных рядов $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$. Штриховая линия показывает верхнюю границу 90%-го доверительного интервала, центр которого расположен на оси абсцисс

Рассчитанная амплитудно-частотная характеристика ЗКС $A(f)$ приведена на рис. 3, на котором горизонтальным отрезком также показана ширина спектрального окна Δf . Приближенная оценка $100(1 - \alpha)\%$ доверительного интервала для математического ожидания $A(f)$ с принятым уровнем значимости α может быть записана как [8]

$$A(f) \pm A(f) \sqrt{\frac{2}{n-2} F_{2,n-2}(1-\alpha) \left[\frac{1 - K_{I,T}^2(f)}{K_{I,T}^2(f)} \right]},$$

где n – число степеней свободы, а $F_{2,n-2}(1 - \alpha)$ – соответствующий квантиль распределения Фишера. Таким образом, доверительный интервал существенно зависит от квадрата функции когерентности и при стремлении $K_{I,T}^2(f)$ к нулю его длина неограниченно возрастает. Вертикальным отрезком на рис. 3 показан 90%-ный доверительный интервал для частоты f , соответствующей максимальному значению функции $Y_{I,T}(f)$.

Сравнение с длиной доверительного интервала на рис. 3 показывает, что наблюдаемые изменения $A(f)$ могут быть объяснены погрешностью оценки. В целом амплитудно-частотная характеристика ЗКС оказывается достаточно ровной и отличной от нуля вплоть до максимальной, достигаемой при месячных интервалах отсчета исходных временных рядов, частоты Найквиста $f_N = 0.5 \text{ мес.}^{-1}$. Тем не менее обращает на себя внимание наличие резонансного пика на частоте 0.0322 мес.^{-1} . Если принять, что погрешность измерения частоты в нашем спектральном анализе составляет величину, равную $\Delta f/2$, то период, соответствующий максимуму пика, оказывается равным 2.6 ± 1.0 год и в пределах погрешности совпадает со средней продолжительностью квазидвухлетнего цикла. Однако из-за невысокой когерентности рядов на этой частоте наличие данного пика нельзя считать статистически значимым.

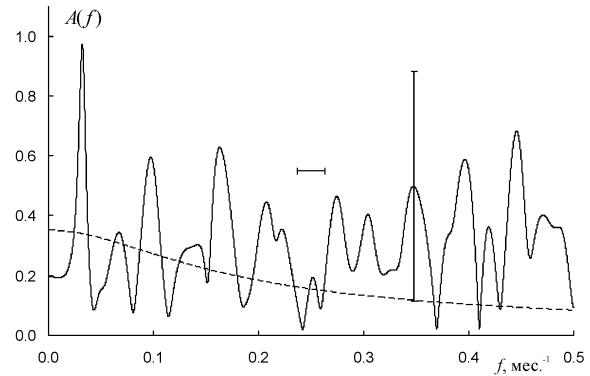


Рис. 3. Рассчитанная амплитудно-частотная характеристика земной климатической системы $A(f)$. Штриховой линией показана амплитудно-частотная характеристика линейной системы первого порядка с постоянной времени $\tau = 1.31 \text{ мес}$

Основной трудностью, с которой мы сталкиваемся при проведении спектрального анализа, является сравнительно малая длина исходных временных рядов. Поэтому мы можем провести оценку $A(f)$ только в области высоких частот. В этой области результаты анализа представляются достаточно надежными и могут быть сопоставлены с полученной нами ранее независимой оценкой импульсной передаточной характеристики ЗКС $h(t)$ [5, 7].

Для линейной системы первого порядка, являющейся простым фильтром низких частот, амплитудно-частотная характеристика имеет вид

$$A(f) = \frac{k}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}, \quad (3)$$

где τ – постоянная времени, а k – коэффициент усиления системы. Выражение (3) описывает монотонно убывающую функцию с максимумом на нулевой частоте. Такое же поведение $A(f)$ характерно и для системы большего порядка, состоящей из параллельно включенных систем первого порядка.

Штриховой линией (см. рис. 3) схематически показана амплитудно-частотная характеристика линейной системы первого порядка с $\tau = 1.31 \text{ мес.}$, равной нашей оценке эквивалентной постоянной времени ЗКС. Интересно отметить, что простая модель радиационного баланса Земли, использующая предположение серой изотермической атмосферы и способная описать влияние парникового эффекта [12], дает значение постоянной времени 39 суток.

Разумеется, ожидать полного совпадения полученной частотной характеристики с нашей оценкой $A(f)$ нельзя. Это связано как с влиянием погрешностей, так и с тем, что восстановленная функция $h(t)$ не является спадающей экспонентой. Основываясь на нашем анализе $A(f)$, можно говорить только о качественном совпадении результатов. Отвлекаясь от случайных флуктуаций



$A(f)$, вызванных влиянием погрешностей оценки, можно сделать вывод, что амплитудно-частотная характеристика ЗКС оказывается достаточно ровной и отличной от нуля вплоть до частоты Найквиста 0.5 мес^{-1} .

Заключение

Проведенное исследование подтверждает наличие реакции климатической системы Земли на радиационное воздействие, вызванное изменением солнечной постоянной $\Delta I(t)$. Анализ почти сорокалетних рядов среднемесячных значений $\Delta I(t)$ и аномалии глобально осредненной приповерхностной температуры $\Delta T(t)$ показывает, что их взаимная корреляционная функция $R_{I,T}(\tau)$ статистически значимо отличается от нуля при малых значениях запаздывания ряда температуры. Спектры мощности временных рядов демонстрируют наличие значимой когерентности в области высоких частот.

Наличие подобной реакции позволяет использовать $\Delta I(t)$ в качестве зондирующего сигнала для оценки характеристик ЗКС, рассматриваемой как инвариантная во времени линейная динамическая система. При этом не накладываются никаких ограничений на вид характеристик и возможный порядок системы.

Найденная нами амплитудно-частотная характеристика $A(f)$ ЗКС отлична от нуля вплоть до частоты Найквиста 0.5 мес^{-1} . Результаты согласуются с полученной ранее оценкой эквивалентной постоянной времени ЗКС $1.31 \pm 0.03 \text{ мес}$. Поведение $A(f)$ в области высоких частот подтверждает высокую скорость реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие, обусловленную влиянием атмосферных процессов. Подчеркнем, что речь идет именно о скорости реакции ЗКС. Время установления системы определяется тепловой инерцией вод океана и должно многократно превышать продолжительность анализируемых рядов.

Библиографический список

1. Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. T. F. Stocker [et al.]. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Дымников В. П., Лысков В. Н., Володин Е. М. Моделирование климата и его изменений : современные проблемы // Вестник РАН. 2012. Т. 82, № 3. С. 227–336.
3. Vardavas I. M., Taylor F. W. Radiation and Climate. New York : Oxford University Press, 2007. 492 p.
4. Bogdanov M. B., Efremova T. Yu., Katrushchenko A. V. Estimation of impulse response of Earth's climate system at short time intervals // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. Vol. 86. P. 51–55.
5. Богданов М. Б., Червяков М. Ю. Оценка времени реакции и чувствительности земной климатической системы к радиационному воздействию // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 4. С. 216–223. <https://www.doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-216-223>
6. Богданов М. Б., Морозова С. В., Червяков М. Ю. Влияние факторов солнечной активности на земную климатическую систему. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2021. 88 с.
7. Бендат Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа. Москва : Мир, 1983. 312 с.
8. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Москва : Мир, 1972. Вып. 2. 288 с.
9. Fröhlich C. Total solar irradiance : what have we learned from the last three cycles and the recent minimum? // Space Science Reviews. 2013. Vol. 176. P. 237–252.
10. Zhang H.-M., Huang B., Lawrimore J., Menne M., Smith T. M. NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 4.0. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.doi.org/10.7289/V5FN144H>
11. Vose R. S., Arndt D., Banzon V. F. NOAA's merged land-ocean surface temperature analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. Vol. 93. P. 1677–1685.
12. Coakley J. A., Yang P. Atmospheric Radiation. Weinheim : Wiley-VCH, 2014. 255 p.

Поступила в редакцию 14.01.2022; одобрена после рецензирования 02.02.2022; принята к публикации 01.03.2022
The article was submitted 14.01.2022; approved after reviewing 02.02.2022; accepted for publication 01.03.2022