



ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.58

Оценка импульсной передаточной характеристики земной климатической системы на столетнем интервале времени

М. Б. Богданов, М. Ю. Червяков

Богданов Михаил Борисович, доктор физико-математических наук, инженер, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kafmeteo@mail.ru

Червяков Максим Юрьевич, кандидат географических наук, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, chervyakovmu@mail.ru

Земная климатическая система (ЗКС) рассматривается как линейная система, входом которой является изменение солнечной постоянной, а выходом – аномалия глобально осредненной приповерхностной температуры. В результате восстановления импульсной передаточной характеристики на столетнем интервале с использованием реконструированных данных о солнечной постоянной и глобальной температуре показано, что ее постоянная времени равна $32 \text{ года} \pm 14 \text{ лет}$. Чувствительность ЗКС к радиационному воздействию составляет $1.31 \pm 0.63 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$, а коэффициент положительной обратной связи – 4.4 ± 2.1 . Найденные значения характеристик ЗКС не противоречат данным, полученным осреднением по ансамблю моделей CMIP5.

Ключевые слова: земная климатическая система, импульсная передаточная характеристика, постоянная времени, чувствительность, теплоемкость.

Поступила в редакцию: 25.05.2020 / Принята: 21.09.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

Estimation of Impulse Response of Earth's Climate System at Century Time Interval

M. B. Bogdanov, M. Yu. Cherviakov

Mikhail B. Bogdanov, <https://orcid.org/0000-0001-5305-8925>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, kafmeteo@mail.ru

Maksim Yu. Cherviakov, <https://orcid.org/0000-0002-7641-3392>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, chervyakovmu@mail.ru

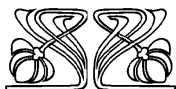
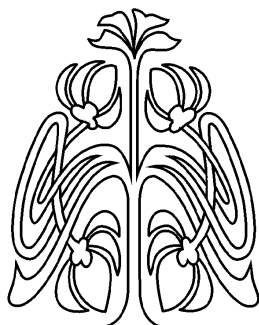
The Earth's climate system (ECS) is considered as a linear system whose input is the change in the solar constant, and whose output is the global mean near-surface temperature anomaly. As a result of the restoration of the impulse response at century time interval using reconstructed data on the solar constant and global temperature it was shown that its time constant is 32 ± 14 years. The sensitivity of the ECS to radiative forcing is $1.31 \pm 0.63 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$, and the positive feedback coefficient is 4.4 ± 2.1 . The found values of the characteristics of the ECS do not contradict the data obtained by averaging over the ensemble of CMIP5 models.

Keywords: Earth's climate system, impulse response, time constant, sensitivity, heat capacity.

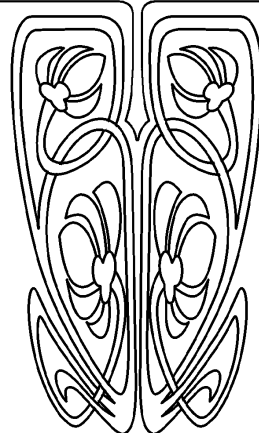
Received: 25.05.2020 / Accepted: 21.09.2020 / Published: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-4-226-233>



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





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 важны независимые оценки значения скорости реакции земной климатической системы (ЗКС) и ее чувствительности к внешнему радиационному воздействию на верхней границе атмосферы (ВГА) [2]. Подобные исследования предпринимались многими авторами. В работах [3–6] характеристики ЗКС находились путем сопоставления аномалии глобально осредненных значений приповерхностной температуры $\Delta T(t)$ с данными заатмосферных наблюдений изменения солнечной постоянной $\Delta I(t)$. Исследования [7–10] основывались на анализе выходного сигнала ЗКС – значений аномалии $\Delta T(t)$. При сопоставлении данных о $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ на больших интервалах времени использовались реконструированные значения [11,12].

В работе [5] была предложена методика восстановления импульсной передаточной характеристики $h(t)$ ЗКС, рассматриваемой как инвариантная во времени линейная система. Было предположено, что входом системы является изменение 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. Знание $h(t)$ полностью характеризует линейную систему, в частности дает возможность оценить значения ее постоянной времени τ и чувствительности к радиационному воздействию λ . В свою очередь, эти характеристики позволяют найти эффективную теплоемкость той части глобальной системы «атмосфера–суша–океан», которая ответственна за реакцию на изменение радиационного воздействия с характерным временем τ . На основе данной методики нами были проанализированы инструментальные ряды среднемесячных значений $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$, что позволило получить оценки $h(t)$ и характеристик ЗКС на интервалах времени длиной до 100 мес. [6]. Эти характеристики дают возможность рассчитать реакцию ЗКС на коротко временные изменения внешнего радиационного воздействия. Большой интерес представляет применение данной методики для оценки $h(t)$ на более продолжительных интервалах, хотя это и потребует использования реконструированных данных о $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ с неизбежным уменьшением надежности полученных результатов.

Целью настоящей статьи является восстановление импульсной передаточной характеристики ЗКС на столетнем интервале времени по реконструированным рядам данных об изменениях солнечной постоянной и глобальной температуры, а также получение информации о постоянной

времени, чувствительности к радиационному воздействию на ВГА и эффективной теплоемкости системы.

Методика восстановления импульсной передаточной характеристики

Детальное описание применяемой методики приведено в работах [5,6], а в данном разделе мы рассмотрим только основные положения.

Гипотеза о линейности ЗКС является вполне допустимой, так как изменения $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ (в абсолютной шкале) малы и составляют порядка десятой доли процента. Предположение случайного шума оправдывается тем, что внутренних факторов системы, способных повлиять на $\Delta T(t)$, достаточно много и они независимы друг от друга. Данное утверждение допускает проверку, результаты которой будут приведены ниже.

При сделанных предположениях все свойства ЗКС определяются импульсной передаточной характеристикой $h(t)$, которая представляет собой выход системы при входном воздействии в виде $\delta(t)$ – функции Дирака. В теоретической физике $h(t)$ обычно называется функцией Грина. Сигналы на входе $\Delta I(t)$ и выходе $\Delta T(t)$ системы связаны интегральным уравнением типа свертки

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

При известных сигналах на входе и выходе системы нахождение $h(t)$ сводится к решению некорректно поставленной обратной задачи для интегрального уравнения (1). Необходимым условием решения подобных задач является использование априорной информации о функции $h(t)$ [13].

Условие устойчивости системы требует, чтобы модуль $h(t)$ достаточно быстро убывал с ростом t . Будем считать, что эта функция отлична от нуля на интервале времени, не превышающем значение a , и соответственно заменим бесконечный верхний предел интеграла (1) конечной величиной a . Выполнение принципа причинности возможно, если $h(t) = 0$ при $t < 0$. Поэтому нижний предел интеграла (1) можно положить равным нулю. Если левая часть уравнения (1) задана на интервале $[c, d]$, то функция $\Delta I(t)$ должна быть известна на интервале времени $[c-a, d]$.

Для системы первого порядка, которая представляет собой фильтр низких частот, импульсная передаточная характеристика при $t \geq 0$ дается выражением

$$h(t) = \frac{k}{\tau} \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right],$$

где τ – постоянная времени, а k – коэффициент усиления системы. Она представляет собой монотонно невозрастающую выпуклую вниз неотрицательную функцию. В случае если ЗКС состоит из нескольких параллельно включенных неза-



висимых систем первого порядка с разными значениями τ (моделирующих влияние атмосферы, суши и океана), результирующая характеристика $h(t)$ будет суммой спадающих экспонент, которая также принадлежит к указанному классу функций. Множество функций подобного вида представляет собой компакт [14]. Как известно, обратная задача для интегрального уравнения (1) на компактном множестве функций является корректной [14] и ее приближенное решение $h_m(t)$ может быть получено минимизацией функционала невязки:

$$\rho[h, \Delta T, \Delta I] = \int_c^d \left\{ \Delta T(t) - \int_0^a h(\xi) \Delta I(t - \xi) d\xi \right\}^2 dt. (2)$$

Доказано, что при стремлении к нулю погрешностей задания входного и выходного сигналов системы $h_m(t)$ равномерно сходится к точному решению задачи $h(t)$ на всем интервале его определения за исключением точек разрыва [14]. Следует отметить, что сходимость гарантируется при любом характере возмущения левой части уравнения (1). Оно вовсе не обязательно должно быть чисто случайным. Поэтому наличие циклических глобальных процессов, подобных явлению Эль-Ниньо, не может повлиять на результат восстановления импульсной передаточной характеристики. Знание величин погрешностей задания $\Delta T(t)$ и $\Delta I(t)$ также не является необходимым, поскольку решение определяется по минимуму невязки. Доказанная сходимость гарантирует устойчивость получаемого решения по отношению к шуму.

Функционал невязки (2) является аналогом суммы квадратов отклонений в классическом методе наименьших квадратов. Известно, что при возмущении исходных данных, имеющем разные

знаки и нулевое среднее значение, этот метод дает несмещенную оценку решения. Достаточным условием является выполнение требования конечности дисперсии возмущения.

Таким образом, находя экстремаль функционала (2) на множестве монотонно невозрастающих выпуклых вниз неотрицательных функций, отвечающем физике нашей задачи, мы получаем устойчивую оценку импульсной передаточной характеристики. При этом ЗКС может быть линейной системой первого порядка или совокупностью таких независимых подсистем с разными постоянными времени. Алгоритмы численной реализации процедуры минимизации и описание соответствующих компьютерных программ приведены в монографиях [14, 15]. Мы использовали эти программы с двумя модификациями: представление переменных с двойной точностью и применение для численного интегрирования формулы Симпсона.

Исходные данные

Для среднегодовых значений солнечной постоянной были использованы данные трех независимых реконструкций за интервал времени 1610–2000 гг.: Дж. Лин (Lean) [16, 17], Н. А. Кривовой (Krivova) и др. [18, 19] (версия марта 2018 г.) и Т. Егоровой (Egorova) и др. [20] (для солнечного модуляционного потенциала РНИ-МС17). Кривые изменения $\Delta I(t)$, полученные вычитанием средних значений рядов, показаны на рис. 1. Как видно из рис. 1, данные [20] демонстрируют большие падения инсоляции в минимумах Маундера и Дальтона по сравнению с двумя другими реконструкциями.

Для среднегодовых значений аномалии глобально осредненной приповерхностной температуры за тот же интервал времени был взят рекон-

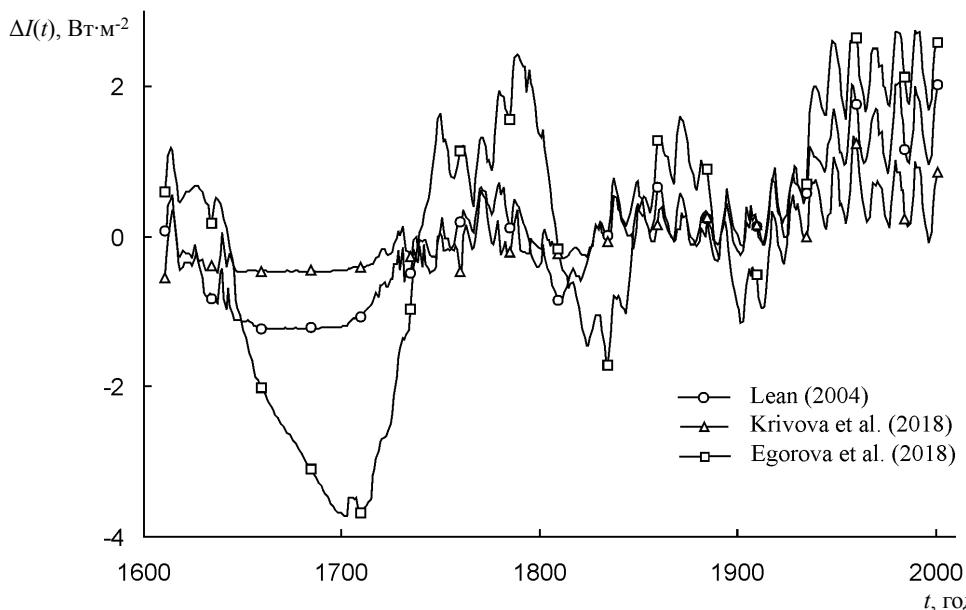


Рис. 1. Изменение солнечной постоянной по реконструированным данным разных авторов



струированный ряд М. Е. Манна (Mann) и др. [21]. Кривая изменения $\Delta T(t)$ приведена на рис. 2. На нем хорошо заметно повышение глобальной температуры, начавшееся приблизительно с начала XX века и связанное с увеличением радиационного воздействия в результате роста концентрации в земной атмосфере парниковых газов.

Как говорилось выше, нашей целью является получение импульсной передаточной характеристики ЗКС на столетнем интервале времени. Это означает, что при времени первого отсчета ряда $\Delta T(t)$ 1610.5 мы можем использовать изменения температуры $\Delta T(t)$ только с момента 1710.5. На длину этого ряда существует, однако, и ограничение сверху.

Совокупное воздействие факторов, влияющих на $\Delta T(t)$, рассматривается нами как случайный шум со средним значением, близким к нулю. В этом случае классический метод наименьших квадратов гарантирует несмещенную оценку. В реальности рост парникового эффекта в XX веке не компенсировался влиянием других факторов. Это нарушает наше предположение о шуме и, поскольку функционал невязки (2) является аналогом суммы квадратов отклонений, способно вызвать искажения восстановленной функции $h(t)$. Для устранения нарушения мы ограничились данными об изменениях температуры только в XVIII–XIX веках.

Подобное ограничение является вынужденной мерой и, естественно, влечет определенные потери. Прежде всего мы не сможем использовать наиболее надежные инструментальные данные о $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$. Кроме того, возникает вопрос: будет ли найденная функция $h(t)$ описывать поведение ЗКС в XXI веке? С потерей информации придется примириться. В отношении поставленного

вопроса можно заметить, что $h(t)$ характеризует глобальную систему «атмосфера–суша–океан» и в отличие от концентрации в атмосфере парниковых газов не может существенно измениться за несколько столетий. По данным Дж. Хансена (Hansen) и др. [22], чувствительность ЗКС к радиационному воздействию в плейстоцене совпадает в пределах погрешности с современными оценками.

Полученные результаты

Мы провели восстановление $h(t)$ на столетнем интервале времени для всех трех реконструированных рядов солнечной постоянной. В каждом случае был достигнут точный минимум функционала (2). Минимальные значения невязок ρ_{\min} приведены в табл. 1 и оказались достаточно близкими друг к другу. Тем не менее в дальнейшем мы находили средневзвешенные значения характеристик, назначая веса обратно пропорциональными ρ_{\min} .

Полученные средневзвешенные значения отсчетов передаточной характеристики приведены на рис. 3. Вертикальными отрезками на нем показаны стандартные отклонения этих значений $\pm\sigma$. Скорость реакции ЗКС на изменение радиационного воздействия на ВГА может быть охарактеризована значением эквивалентной постоянной времени τ , за которое обычно принимается момент t , когда $h(t)$ уменьшается в $e = 2.718$ раз от максимума. Средневзвешенное значение эквивалентной постоянной времени ЗКС оказалось равным $\tau = 32$ годам ± 14 лет.

Толстой сплошной линией на рис. 4 показана реконструированная аномалия $\Delta T(t)$, а линиями со значками, совпадающими с обозначениями разных рядов реконструкций $\Delta I(t)$ на рис. 1, отмечены три аномалии глобальной температуры, со-

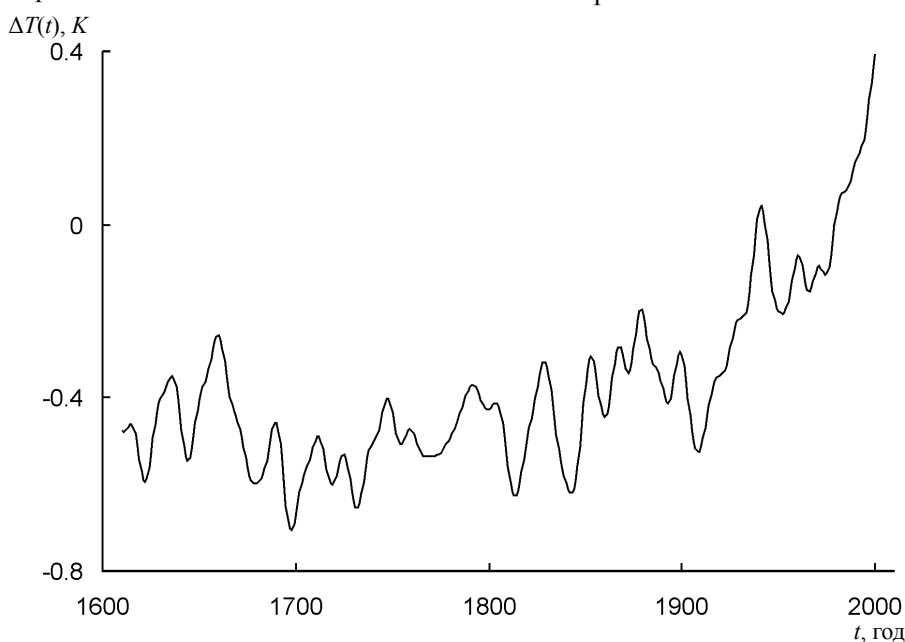


Рис. 2. Аномалия глобально осредненной приповерхностной температуры по данным реконструкции Манна и др. [21]



Таблица 1

Минимальные значения невязки ρ_{\min} , средние величины остаточных отклонений $\overline{\Delta T}$, их стандартные отклонения σ , значения параметра Колмогорова λ_K и коэффициенты усиления k , полученные по разным рядам реконструкций солнечной постоянной

Ряд $\Delta I(t)$	ρ_{\min} , $K^2 \text{ год}$	$\overline{\Delta T}$, K	σ , K	λ_K	k , $K \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$
Lean [16,17]	1.29	-0.002	0.082	0.981	0.163
Krivova et al. [18,19]	1.25	-0.004	0.081	1.074	0.436
Egorova et al. [20]	1.30	0.001	0.083	0.547	0.068

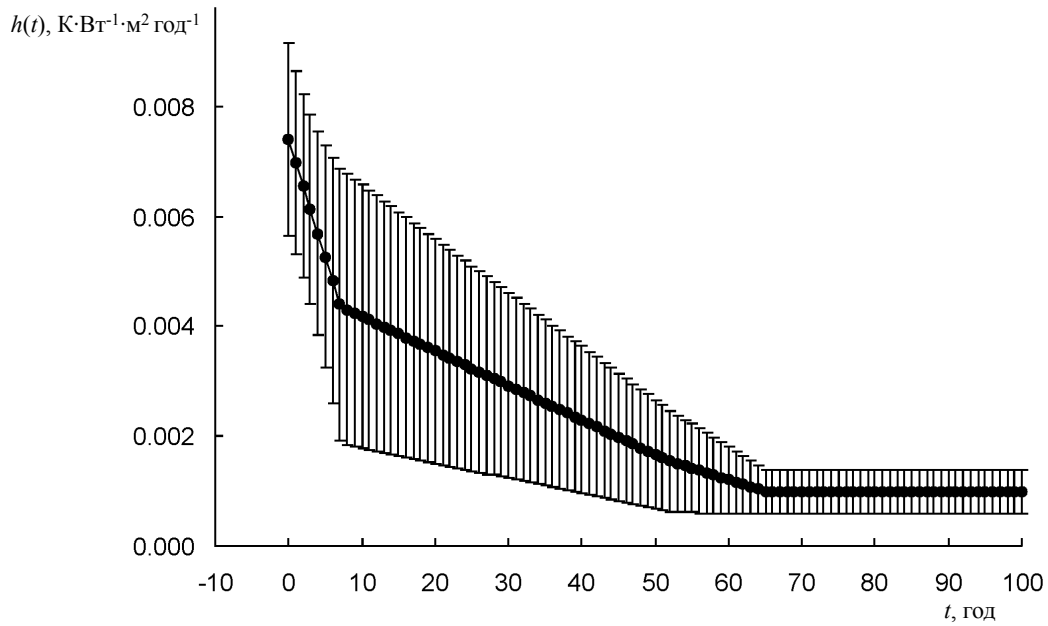


Рис. 3. Средневзвешенные значения импульсной передаточной характеристики земной климатической системы

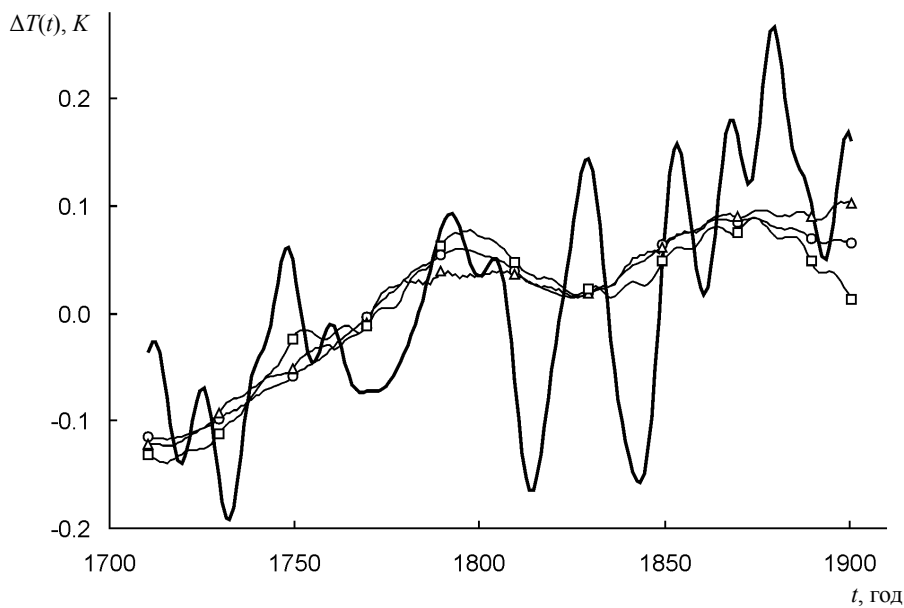


Рис. 4. Значения аномалии температуры, соответствующие восстановленным импульсным передаточным характеристикам, по данным разных авторов. Толстой сплошной линией показана аномалия температуры по данным реконструкции Манна и др. [21]. Условные обозначения см. рис. 1



ответствующие восстановленным характеристикам $h(t)$ согласно интегральному уравнению (1). Эти линии описывают возможную реакцию ЗКС как предполагаемой нами линейной системы на изменения солнечной постоянной. Они оказываются достаточно близкими друг к другу, подтверждая таким образом близость значений ρ_{\min} . Совокупное воздействие на глобальную температуру других факторов на столетнем интервале в XVIII веке оказалось сопоставимо с влиянием изменений $\Delta I(t)$, а в XIX веке превосходило их (см. рис. 4).

Характер остаточных отклонений аномалий $\Delta T(t)$ на рис. 4 не противоречит предположению о случайном шуме, но более детальные выводы могут быть получены при их статистическом анализе. Естественно ожидать, что распределение этих отклонений должно быть близко к нормальному распределению с нулевым математическим ожиданием. Средние значения остаточных отклонений аномалий $\overline{\Delta T}$ и их стандартные отклонения σ приведены в табл. 1. Как видно из нее, для всех трех случаев $\overline{\Delta T}$ практически не отличаются от нуля. Мы выполнили проверку гипотез о нормальности распределений остаточных отклонений аномалий температуры, соответствующих восстановленным импульсным передаточным характеристикам, с использованием критерия Колмогорова–Смирнова. Найденные значения параметров Колмогорова $\lambda_K = D\sqrt{N}$, где D – модуль максимального различия теоретической и эмпирической функций распределения, а $N = 191$ – объем выборки, также приведены в табл. 1. Критическое значение параметра Колмогорова для уровня значимости $\alpha = 0.10$ равно 1.22. Так как все значения λ_K не превышают критическое, то гипотеза о нормальности распределений не может быть отвергнута и исходное предположение о случайном характере суммарного воздействия внутренних факторов ЗКС, влияющих на глобальную температуру в XVIII–XIX веках, представляется достаточно обоснованным.

Импульсная передаточная характеристика ЗКС дает возможность оценить величину коэффициента усиления k , связывающего установившееся изменение на выходе системы ΔT с заданным изменением входного сигнала ΔI : $\Delta T = k \Delta I$.

Эта величина определяется интегралом

$$k = \int_0^{\infty} h(t) dt$$

и для наших оценок $h(t)$ численное интегрирование по формуле трапеций дает значения коэффициентов, приведенные в табл. 1. Средневзвешенное значение $k = 0.23 \pm 0.11 \text{ К}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$. Как видно из табл. 1, несмотря на отмеченную ранее близость трех кривых аномалии глобальной температуры, соответствующих восстановленным характеристикам $h(t)$, коэффициенты усиления заметно различаются.

Знание k позволяет найти чувствительность ЗКС к изменению радиационного воздействия на ВГА λ , которая определяется как установившееся изменение температуры (в К) при увеличении воздействия на $1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, и дается выражением

$$\lambda = \frac{4k}{1-\beta},$$

где β – среднее значение альbedo Земли. Принимая $\beta = 0.30$, получим средневзвешенную величину чувствительности $\lambda = 1.31 \pm 0.63 \text{ К}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$.

Значение чувствительности может быть найдено при рассмотрении радиационного баланса безатмосферной планеты в приближении абсолютно черного тела и оказывается равным $\lambda_0 = 0.30 \text{ К}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$. При этом, реагируя на изменение радиационного воздействия, климатическая система планеты ведет себя как линейная система первого порядка с постоянной времени $\tau_0 = C\lambda_0$, где C – теплоемкость на единицу площади поверхности. Оценки чувствительности ЗКС λ , как правило, дают значения, превышающие λ_0 . Подобное увеличение чувствительности объясняется наличием положительной обратной связи, которая может проявляться в уменьшении излучательной способности и (или) планетарного альbedo с ростом температуры. В первом приближении наличие обратной связи можно учесть, введя ее коэффициент f . Тогда эффективное значение чувствительности оказывается равным $\lambda = f\lambda_0$.

Использование полученных нами средневзвешенных значений характеристик ЗКС τ и λ позволяет найти оценки величины коэффициента обратной связи $f = 4.4 \pm 2.1$ и эффективной теплоемкости системы $C = 770 \pm 710 \text{ МДж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{м}^2$. Погрешности оценок достаточно велики. Тем не менее среднее значение C в 74 раза превышает соответствующую величину для атмосферы Земли. Это свидетельствует о том, что за реакцию ЗКС на радиационное воздействие на столетнем интервале времени ответственна не только атмосфера, но и суша, а также верхние слои океана.

Необходимо дополнить полученные данные о характеристике $h(t)$ ЗКС информацией о ее поведении на коротких интервалах времени. Для этого мы использовали три первых отсчета $h(t)$ с интервалом в месяц, полученных в работе [6]. Данные отсчеты были нормированы исходя из условия сохранения коэффициента усиления при переходе к годовому интервалу измерения времени. Значения объединенной импульсной передаточной характеристики ЗКС и их стандартные отклонения σ приведены в табл. 2. Отсчеты $h(t)$ для других моментов времени внутри рассмотренного интервала могут быть найдены с помощью линейной интерполяции. Данные табл. 2 позволяют рассчитать аномалию $\Delta T(t)$ при известных изменениях $\Delta I(t)$ на интервале времени от одного месяца до ста лет.



Таблица 2

Значения объединенной импульсной передаточной характеристики земной климатической системы $h(t)$ и их стандартные отклонения σ

t , год	$h(t)$, $\text{K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2\cdot\text{год}^{-1}$	σ , $\text{K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2\cdot\text{год}^{-1}$
0.00	0.4080	0.0750
1/12	0.2090	0.0340
1/6	0.0140	0.0051
1.0	0.0070	0.0017
3.0	0.0061	0.0017
5.0	0.0053	0.0020
7.0	0.0044	0.0025
10	0.0042	0.0024
20	0.0036	0.0020
40	0.0023	0.0013
60	0.0012	0.0006
80	0.0010	0.0004
100	0.0010	0.0004

Сравнение результатов с данными независимых исследований

Проведенный нами ранее анализ средне-месячных значений инструментальных рядов данных о $\Delta I(t)$ и $\Delta T(t)$ показал, что на интервале времени в несколько месяцев ЗКС ведет себя как линейная система с постоянной времени $\tau = 1.305 \pm 0.026$ мес. и чувствительностью $\lambda = 0.320 \pm 0.074 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$. При этом эффективная теплоемкость оказывается практически равной теплоемкости атмосферы на единицу площади поверхности Земли $10.4 \text{ МДж}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{м}^2$, следовательно, реакция ЗКС на изменение солнечной постоянной на таком интервале времени может быть объяснена только атмосферными процессами [6]. Полученное по реконструированным данным в XVIII–XIX веках значение чувствительности $\lambda = 1.31 \pm 0.63 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$ оказывается в четыре раза больше. Увеличение чувствительности не является неожиданным. Формальный коэффициент усиления k получается как интеграл от неотрицательной функции $h(t)$ и при увеличении интервала интегрирования должен уменьшаться. Однако для реализации такой чувствительности ЗКС внешнее радиационное воздействие величиной в $1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ должно оставаться неизменным в течение столетия. За это время успевают нагреться не только атмосфера, но и суша, а также верхние слои океана.

По данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC), приведенным в докладе AR4, значение чувствительности $\lambda = 0.8 \pm 0.4 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$ [7]. В последнем докладе этой организации [1] величина λ не приведена, однако дается полученное осреднением по ансамблю МОЦАО CMIP5 повышение глобально осредненной температуры, соответствующее двукратному увеличению концентрации CO_2 в атмосфере. Его среднее значение равно 3.2 K с 90%-м доверительным интервалом $[2.1 \text{ K}, 4.7 \text{ K}]$. С учетом того, что подобное увеличение

концентрации парникового газа эквивалентно росту радиационного воздействия на $3.70 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ с соответствующим интервалом $[2.96 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}, 4.44 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}]$ [1] можно получить среднее значение чувствительности $\lambda = 0.86 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$ с 90%-м доверительным интервалом $[0.47 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2, 1.59 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2]$. Аналогичный доверительный интервал для среднего значения коэффициента обратной связи $f = 2.87$ может быть записан как $[1.57, 5.30]$. Полученные нами средние значения λ и f оказываются в пределах этих доверительных интервалов.

Интересно отметить, что чувствительность ЗКС остается неизменной в течение длительного времени. По данным Дж. Хансена (Hansen) и др. [22], в плейстоцене для интервала времени порядка столетия $\lambda = 0.75 \pm 0.25 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$.

Заключение

Применяемая нами методика восстановления импульсной передаточной характеристики ЗКС на компактном множестве монотонно невозрастающих выпуклых вниз неотрицательных функций не налагает жестких модельных ограничений на вид $h(t)$. В этом случае ЗКС может быть линейной системой первого порядка или совокупностью таких независимых подсистем с разными постоянными времени.

Результаты восстановления $h(t)$ по реконструированным данным о солнечной постоянной и глобально осредненной температуре на столетнем интервале дают величину эквивалентной постоянной времени $\tau = 32 \pm 14$ года и чувствительность к радиационному воздействию $\lambda = 1.31 \pm 0.63 \text{ K}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$. При этом коэффициент положительной обратной связи оказывается равным $f = 4.4 \pm 2.1$, а эффективная теплоемкость ЗКС на единицу площади $C = 770 \pm 710 \text{ МДж}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{м}^2$ и многократно превышает теплоемкость атмосферы. Это свидетельствует о том, что за реакцию ЗКС на радиационное воздействие на столетнем интервале времени ответственна не



только атмосфера, но и суша, а также верхние слои океана. Для реализации такой чувствительности ЗКС λ внешнее радиационное воздействие величиной в $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ должно оставаться неизменным в течение столетия.

Погрешности оценок достаточно велики. Однако использованная нами методика независима от модельных расчетов. Найденные значения характеристик ЗКС не противоречат данным, полученным осреднением по ансамблю МОЦАО CMIP5.

Полученная объединенная импульсная передаточная характеристика ЗКС позволяет рассчитать аномалию глобально осредненной приповерхностной температуры при известных изменениях солнечной постоянной на интервале времени от одного месяца до ста лет.

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 Univ. 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. 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 [Электронный ресурс]. URL: <http://arxiv.org/abs/physics/0411002> (дата обращения: 05.03.2020).
4. Lockwood M. Recent changes in solar outputs and the global mean surface temperature. III. Analysis of contributions to global mean air surface temperature rise // Proceedings of the Royal Society A. 2008. Vol. 464. P. 1387–1404.
5. 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.
6. Богданов М. Б., Червяков М. Ю. Оценка времени реакции и чувствительности земной климатической системы к радиационному воздействию // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 4. С. 216–223. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-216-223>
7. Schwartz S. E. Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. D24S05. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JD008746>
8. 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" // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. D15105. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JD009872>
9. Scafetta N. Comment on "Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system" by S. E. Schwartz // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. D15104. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JD009586>
10. Scafetta N. Empirical analysis of the solar contribution to global mean air surface temperature change // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. Vol. 71. P. 1916–1923.
11. 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 // Доклады РАН. 2006. Т. 409, № 1. С. 115–119.
12. Мохов И. И., Смирнов Д. А. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и изменений глобальной приповерхностной температуры Земли // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 3. С. 283–293.
13. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1979. 142 с.
14. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М. : Наука, 1983. 200 с.
15. Гончарский А. В., Черепанчук А. М., Ягола А. Г. Некорректные задачи астрофизики. М. : Наука, 1985. 352 с.
16. Lean J. Evolution of the Sun's spectral irradiance since the Maunder minimum // Geophysical Research Letters. 2000. Vol. 27. P. 2425–2428.
17. Lean J. Solar irradiance reconstruction // IGBP Pages. World Data Center for Paleoclimatology. Data Contribution Series. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program. Boulder, CO, USA. 2004. № 2004-035. P. 1–12.
18. Krivova N. A., Vieira L. E. A., Solanki S. K. Reconstruction of solar spectral irradiance since the Maunder minimum // Journal of Geophysical Research. 2010. Vol. 115. A12112. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010JA015431>
19. Yeo K. L., Krivova N. A., Solanki S. K. Solar cycle variation in solar irradiance // Space Science Reviews. 2014. Vol. 186. P. 137–167. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0061-7>.
20. Egorova T., Schmutz W., Rozanov E., Shapiro A. I., Usoskin I., Beer J., Tagirov R. V., Peter T. Revised historical solar irradiance forcing // Astronomy and Astrophysics. 2018. Vol. 615. A85. P. 101–116. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731199>
21. Mann M. E., Zhang Z., Hughes M. K., Bradley R. S., Miller S. K., Rutherford S., Ni F. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008. Vol. 105. P. 13252–13257. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0805721105>
22. Hansen J., Sato M., Russell G., Kharecha P. Climate sensitivity, sea level, and atmospheric carbon dioxide // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2013. Vol. 371. P. 234–245. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0294>

Образец для цитирования:

Богданов М. Б., Червяков М. Ю. Оценка импульсной передаточной характеристики земной климатической системы на столетнем интервале времени // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 226–233. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-4-226-233>

Cite this article as:

Bogdanov M. B., Chervikov M. Yu. Estimation of Impulse Response of Earth's Climate System at Century Time Interval. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 226–233 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-4-226-233>