



## ГЕОГРАФИЯ

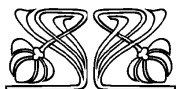
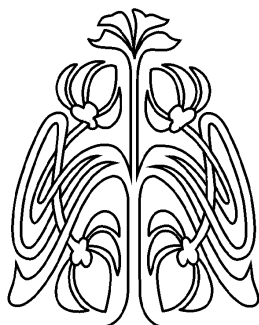
УДК 551.58

### Оценка времени реакции и чувствительности земной климатической системы к радиационному воздействию

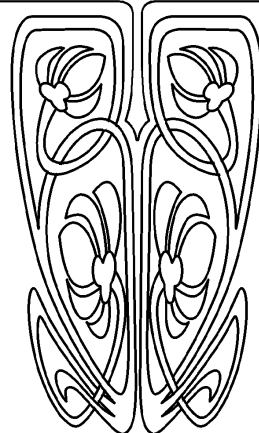
М. Б. Богданов, М. Ю. Червяков

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, доцент, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, chervyakovmu@mail.ru



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ



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 системы на интервале времени до 100 мес. показано, что скорость ее реакции может быть охарактеризована постоянной времени  $1.305 \pm 0.026$  мес. Чувствительность ЗКС к радиационному воздействию равна  $0.320 \pm 0.074 \text{ K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$ , а коэффициент положительной обратной связи  $1.07 \pm 0.25$ . Теплоемкость ЗКС на единицу площади составляет  $10.7 \pm 2.6 \text{ МДж} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{м}^2$  и практически совпадает с теплоемкостью атмосферы. Поэтому реакция ЗКС на изменение радиационного воздействия на таком интервале времени может определяться атмосферными процессами.

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

#### Estimation of Response Time and Sensitivity of the Earth's Climate System to Radiative Forcing

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 a change in the solar constant, and the output is an anomaly of the globally averaged surface temperature. As a result of the restoration, the impulse response of the system was obtained at time intervals up to 100 months. It has been shown that the response time of ECS can be characterized by a time constant of  $1.305 \pm 0.026$  months. The sensitivity of ECS to radiative forcing is  $0.320 \pm 0.074 \text{ K W}^{-1} \text{ m}^2$ , and the positive feedback coefficient is  $1.07 \pm 0.25$ . The heat capacity of the ECS per unit area is  $10.7 \pm 2.6 \text{ MJ K}^{-1} \text{ m}^{-2}$  and practically coincides with the heat capacity of the atmosphere. Therefore, the reaction of ECS to a change in radiative forcing at such a time interval can be determined by atmospheric processes.

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-216-223>

#### Введение

Многие авторы рассматривают простые модели земной климатической системы (ЗКС), описывающие связь аномалии глобально осредненных значений приповерхностной температуры  $\Delta T(t)$  с изменением



внешнего радиационного воздействия на верхней границе атмосферы (ВГА) [1–7]. Такие модели, часто называемые нуль-мерными, несравнимы по сложности с моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), применяемыми при изучении проблемы глобального изменения климата [8]. Однако получаемые с их помощью значения скорости реакции ЗКС и ее чувствительности к внешнему радиационному воздействию позволяют эффективно контролировать существующие МОЦАО [9]. Независимые оценки этих характеристик были получены также благодаря анализу автокорреляционной функции аномалии  $\Delta T(t)$  [10–12].

В работе [6] была предложена методика восстановления импульсной передаточной характеристики  $h(t)$  ЗКС, рассматриваемой как инвариантная во времени линейная система, и получены оценки  $h(t)$  на интервале времени длиной до 100 мес. Предполагалось, что входным воздействием на ЗКС является изменение солнечной постоянной  $\Delta I(t)$ , а выходом системы – 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  $\tau$  и чувствительности к радиационному воздействию  $\lambda$ . 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  $\tau$  [7]. К настоящему времени получены более продолжительные и точные ряды измерений  $\Delta T(t)$  и  $\Delta I(t)$ . Поэтому важно выполнить оценку характеристик ЗКС с использованием нового наблюдательного материала.

Целями данной статьи являются получение импульсной передаточной характеристики ЗКС на интервалах времени до 100 мес., оценка ее постоянной времени и чувствительности к радиационному воздействию, а также коэффициента обратной связи, влияющего на величину чувствительности системы и эффективной теплоемкости.

### Основные характеристики земной климатической системы

Будем рассматривать ЗКС как инвариантную во времени линейную систему, входным воздействием для которой является изменение солнечной постоянной  $\Delta I(t)$ , а выходом – аномалия  $\Delta T(t)$ . Известно, что такая система описывается обыкновенным неоднородным дифференциальным уравнением  $n$ -го порядка для  $\Delta T(t)$  с постоянными коэффициентами, правой частью которого является входное воздействие  $\Delta I(t)$ . Число  $n$  называется также порядком системы. Подобное представление

ЗКС может вызвать обоснованную критику, так как, во-первых, реальная глобальная климатическая система не линейна, а во-вторых, существуют другие факторы, влияющие на изменение  $\Delta T(t)$ .

Нелинейность ЗКС может проявляться, в частности, в том, что ее характеристики зависят от величины внешнего радиационного воздействия. Однако на интервале времени около 40 лет, для которого имеются заатмосферные измерения солнечной постоянной, изменения  $\Delta I(t)$  и  $\Delta T(t)$  (в абсолютной шкале) составляют порядка десятой доли процента. В этом случае предположение о линейности ЗКС является вполне допустимым.

Вторая причина более существенна. Глобально осредненная температура подвержена влиянию ряда внутренних факторов системы, которые могут иметь как циклический (явление Эль-Ниньо, квазидвухлетний цикл), так и случайный (флуктуации концентрации вулканического аэрозоля) характер. Можно, однако, предположить, что совокупное влияние таких независимых факторов будет вести себя подобно случайному шуму. Данное предположение допускает проверку, результаты которой будут приведены ниже. Тем не менее необходимо, чтобы применяемая методика анализа данных обладала хорошей устойчивостью по отношению к шуму.

Одной из основных характеристик ЗКС является чувствительность к радиационному воздействию на ВГА  $\lambda$ , которая определяется как установившееся изменение температуры (в градусах К) при увеличении воздействия на  $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Значение этой характеристики легко 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, ЗКС ведет себя как линейная система первого порядка с постоянной времени  $\tau_0 = C\lambda_0$ , где  $C$  – теплоемкость на единицу площади поверхности планеты [7].

Оценки реальной чувствительности ЗКС  $\lambda$ , как правило, дают значения, превышающие  $\lambda_0$ . Так, Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC) использовала значение чувствительности  $\lambda = 0.8 \pm 0.4 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$ . В последнем докладе этой организации [8] величина  $\lambda$  не приведена, однако дается полученная осреднением по ансамблю МОЦАО CMIP5 величина повышения глобально осредненной температуры, соответствующая двукратному увеличению концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Ее среднее значение равно  $3.2 \text{ К}$  с 90%-м доверительным интервалом [2.1 К, 4.7 К]. 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  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ] [8], можно получить среднее значение чувствительности  $\lambda = 0.86 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$  с 90%-м доверительным интервалом [0.47  $\text{К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$ , 1.59  $\text{К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$ ].



Увеличение чувствительности ЗКС по сравнению с безатмосферной планетой обычно объясняется наличием положительной обратной связи, которая может проявляться в уменьшении излучательной способности и (или) уменьшении планетарного альбеда с ростом температуры [7]. В первом приближении наличие обратной связи можно учесть, введя ее коэффициент  $f$ . Тогда эффективное значение чувствительности оказывается равным  $\lambda = f\lambda_0$ . При этом сохранение теплоемкости ЗКС требует соответствующего изменения постоянной времени  $\tau = f\tau_0$ .

Оценка характеристик ЗКС  $\tau$  и  $\lambda$  позволяет определить величины коэффициента обратной связи  $f$  и эффективной теплоемкости системы  $C$ .

### Импульсная передаточная характеристика и методика ее восстановления

Все свойства ЗКС, рассматриваемой как инвариантная во времени линейная система, 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  $\Delta T(t)$  такой 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  $a$ , соответственно бесконечный верхний предел интеграла (1) заменим 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 импульсная передаточная характеристика при  $t \geq 0$  представлена выражением

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

где  $\tau$  – постоянная времени, а  $k$  – коэффициент усиления системы. Эта характеристика представляет собой монотонно невозрастающую выпуклую вниз неотрицательную функцию. В случае

если ЗКС состоит из нескольких параллельно включенных независимых систем первого порядка (моделирующих влияние атмосферы, суши и океана) с разными значениями  $\tau$ , результирующая характеристика  $h(t)$ , которая также принадлежит к указанному классу функций, будет суммой спадающих экспонент. 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:

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

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 описания 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.



### Наблюдательные данные

Для солнечной постоянной был взят композитный ряд PMOD TSI среднесуточных значений, измеренных в новой шкале эксперимента VIRGO [16] ([ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/composite\\_42\\_65\\_1805.dat/](ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/composite_42_65_1805.dat/)). Отдельные отсутствующие значения ряда были заполнены нами с применением линейной интерполяции, после чего проводился расчет среднемесячных значений. Изменения  $\Delta I(t)$ , полученные вычитанием среднего значения солнечной постоянной  $1360.8782 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , показаны на рис. 1. По оси абсцисс отложено время, выраженное числом месяцев с начала ряда. 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) [17, 18] с сервера

сети Интернет ([ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaaglobaltemp/operational/timeseries/aravg.mon.land\\_ocean.90S.90N.v4.0.1.201806.asc/](ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaaglobaltemp/operational/timeseries/aravg.mon.land_ocean.90S.90N.v4.0.1.201806.asc/)). Поскольку мы интересуемся скоростью реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие, то из ряда был вычтен линейный тренд  $\Delta T(t) = a t + b$ , коэффициенты которого  $a = (1.374 \pm 0.041) \times 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{мес.}^{-1}$ ,  $b = (-8.85 \pm 1.12) \times 10^{-2} \text{ К}$  были найдены с использованием метода наименьших квадратов. Значения отклонений аномалии температуры  $\Delta T(t)$  от линейного тренда показаны на рис. 2.

Нельзя исключить, что в изменениях  $\Delta T(t)$  может проявлять себя составляющая с годичным периодом, отсутствующая в вариациях солнечной постоянной  $\Delta I(t)$ . Для устранения этого эффекта обычно применяется фильтрация из ряда  $\Delta T(t)$  синусоиды с периодом 12 мес. и ее гармоник [6, 10]. Однако в нашем случае специальный анализ ряда  $\Delta T(t)$  не выявил наличия сезонных изменений. Средние значения отклонений аномалии температуры от линейного тренда, свернутых с

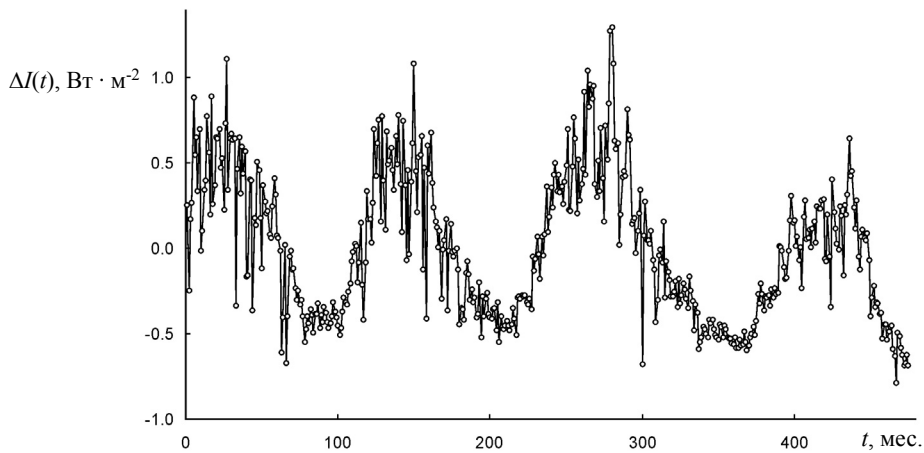


Рис. 1. Изменение солнечной постоянной по данным композитного ряда PMOD TSI

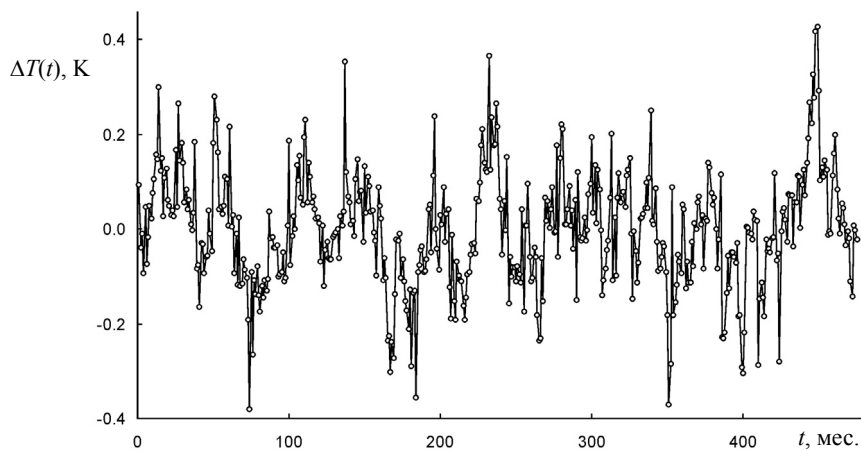


Рис. 2. Отклонения аномалии глобально осредненной приповерхностной температуры от линейного тренда



12-мес. периодом, приведены на рис. 3. Вертикальными отрезками на рис. 3 показаны среднеквадратические отклонения  $\pm\sigma$ . Как видно из рис. 3, для всех отсчетов нулевое значение попадает в интервал  $\pm\sigma$ , следовательно, гипотеза об отсутствии влияния сезонных изменений не может быть отвергнута на любом обычно применяемом уровне значимости.

### Полученные результаты

Мы провели восстановление  $h(t)$  на девяти интервалах длиной от  $a = 17$  мес. до максимального значения  $a = 101$  мес. В каждом случае был достигнут точный минимум функционала (2). Полученные средние значения отсчетов передаточной характеристики приведены на рис. 4.

Вертикальными отрезками на рис. 4 показаны среднеквадратические отклонения средних значений  $\pm\sigma$ .

Как видно из рис. 4, функция  $h(t)$  сначала быстро убывает с ростом аргумента, а начиная с  $t = 2$  мес., ее уменьшение становится достаточно плавным. Скорость реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие может характеризоваться значением эквивалентной постоянной времени  $\tau$ , за которое принимается момент  $t$ , когда  $h(t)$  уменьшается в  $e = 2.718$  раз от максимума. Средняя величина эквивалентной постоянной времени оказалась равной  $\tau = 1.305 \pm 0.026$  мес.

В качестве примера на рис. 5 толстой сплошной линией показана аномалия  $\Delta T(t)$ , соответствующая восстановленной характеристике  $h(t)$  согласно интегральному уравнению (1) для

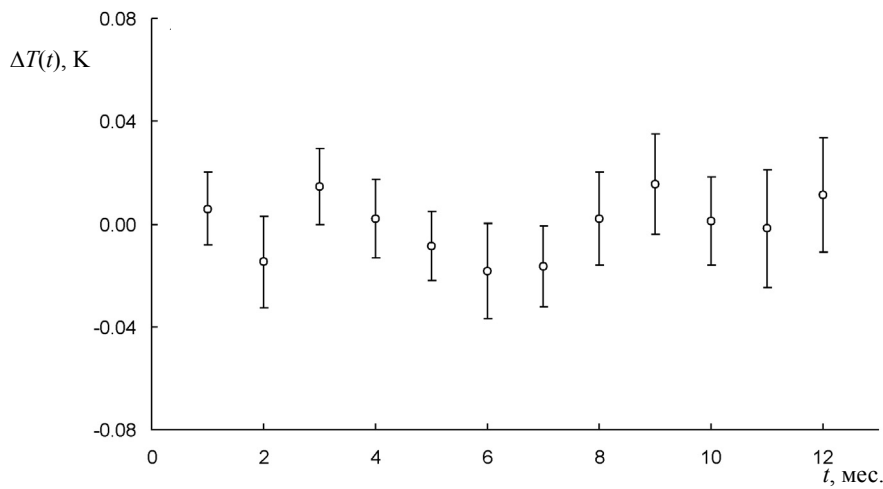


Рис. 3. Средние значения отклонений аномалии температуры от линейного тренда, свернутых с периодом 12 мес.

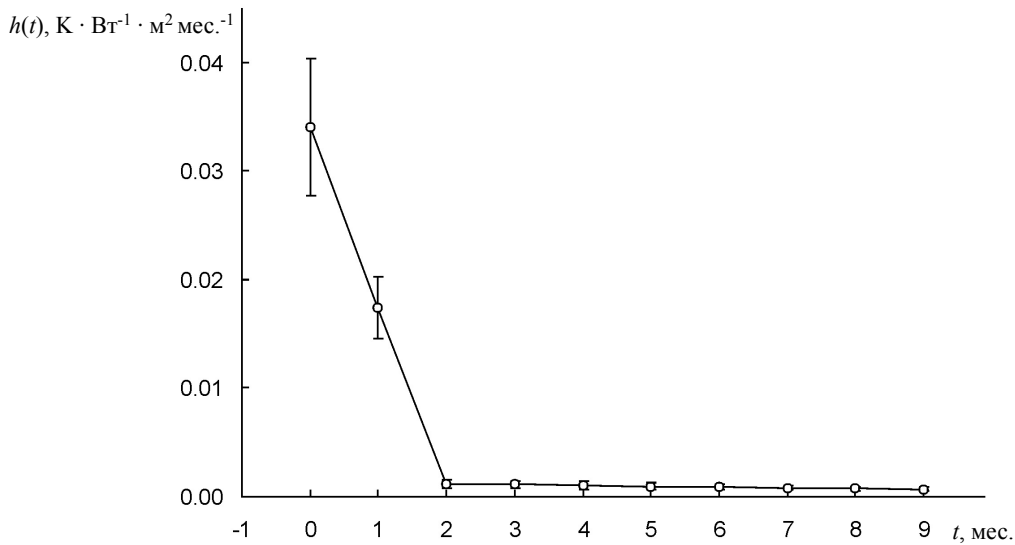


Рис. 4. Средние значения импульсной передаточной характеристики земной климатической системы

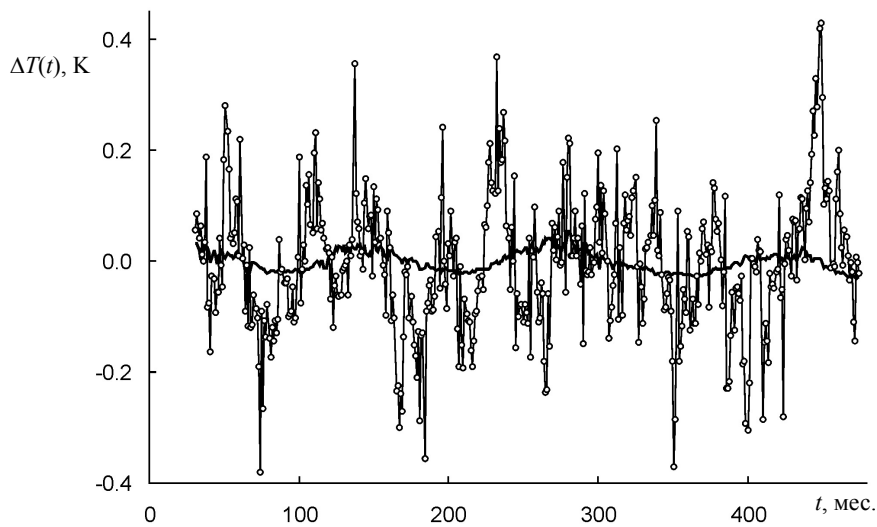


Рис. 5. Отклонения аномалии температуры от линейного тренда

$a = 31$  мес. Эта сплошная линия описывает возможную реакцию ЗКС как предполагаемой нами линейной системы на наблюдаемые изменения солнечной постоянной. Видно, что совокупное воздействие на глобальную температуру других факторов многократно превышает влияние изменений  $\Delta I(t)$ . Характер остаточных отклонений аномалий  $\Delta T(t)$  на рис. 5 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.

Среднее значение остаточных отклонений аномалии оказалось равным 0.00 К, а их стандартное отклонение 0.12 К. Мы выполнили проверку гипотезы о нормальности распределения остаточных отклонений аномалии температуры, соответствующих восстановленной импульсной передаточной характеристике, с использованием критерия Колмогорова–Смирнова. Найденное значение параметра Колмогорова  $\Lambda = D\sqrt{N}$ , где  $D = 0.0428$  – модуль максимального различия теоретической и эмпирической функций распределения, а  $N = 445$  – объем выборки, оказалось равным 0.903. Критическое значение параметра Колмогорова для уровня значимости  $\alpha = 0.10$  равно 1.22. Таким образом, гипотеза о нормальности распределения не может быть отвергнута и исходное предположение о случайном характере суммарного воздействия внутренних факторов ЗКС, влияющих на глобальную температуру, представляется достаточно обоснованным.

Знание импульсной передаточной характеристики ЗКС позволяет оценить величину коэффициента усиления  $k$ , связывающего установивше-

еся изменение на выходе системы  $\Delta T$  с заданным изменением входного сигнала  $\Delta I$ :  $\Delta T = k \Delta I$ .

Эта величина определяется интегралом

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

По результатам наших расчетов численное интегрирование решений по формуле трапеций дает среднее значение  $k = 0.056 \pm 0.013 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$ . В свою очередь, знание  $k$  позволяет найти значение чувствительности ЗКС к изменению радиационного воздействия на ВГА:

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

где  $\beta$  – среднее значение альбедо Земли. Принимая  $\beta = 0.30$ , получим среднюю величину чувствительности  $\lambda = 0.320 \pm 0.074 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$ . Таким образом, на малых интервалах времени чувствительность ЗКС к радиационному воздействию близка к чувствительности безатмосферной планеты.

Для найденного нами значения  $\lambda$  коэффициент обратной связи ЗКС  $f = 1.07 \pm 0.25$ , что существенно меньше величины, используемой МГЭИК [8]. Из приведенных выше данных последнего доклада этой организации можно получить среднее значение коэффициента  $f = 2.87$  с 90%-м доверительным интервалом [1.57, 5.30]. Отмеченное противоречие можно объяснить. Считается, что время установления системы составляет  $3\tau$ , в нашем случае оно близко к 4 мес., в то время как МГЭИК оперирует со среднегодовыми значениями характеристик ЗКС на большом интервале времени. Коэффициент усиления  $k$  получается как интеграл от неотрицательной функции  $h(t)$ , и при увеличении интервала ин-



тегрирования он не должен уменьшаться. Полученные нами значения  $k$ ,  $\lambda$  и  $f$  характерны для короткой временной реакции ЗКС и их следует рассматривать как нижние пределы соответствующих величин.

Найденные средние значения  $\tau$  и  $\lambda$  позволяют оценить эффективную теплоемкость ЗКС на единицу площади –  $C$ , проявляющую себя при радиационном воздействии с характерным временем  $\tau$ . Приняв среднюю продолжительность месяца 30.5 сут получим  $C = 10.7 \pm \pm 2.6$  МДж  $\cdot$  К $^{-1}$   $\cdot$  м $^{-2}$ . Согласно А. С. Мони-ну [19], полная теплоемкость земной атмосферы составляет  $5.32 \times 10^{15}$  МДж  $\cdot$  К $^{-1}$ . Разделив эту величину на площадь поверхности Земли, найдем  $C_{\text{атм}} = 10.4$  МДж  $\cdot$  К $^{-1}$   $\cdot$  м $^{-2}$ . Таким образом, эффективная теплоемкость ЗКС оказывается практически равной теплоемкости атмосферы. Это говорит о том, что реакция ЗКС на изменение солнечной постоянной на рассматриваемом интервале времени может быть объяснена только атмосферными процессами.

#### Сравнение результатов с данными независимых исследований

Как уже отмечалось выше, полученное по данным МГЭИК [8] среднее значение чувствительности ЗКС к радиационному воздействию оказывается равным  $\lambda = 0.86$  К  $\cdot$  Вт $^{-1}$   $\cdot$  м $^2$  с 90%-м доверительным интервалом [0.47 К  $\cdot$  Вт $^{-1}$   $\cdot$  м $^2$ , 1.59 К  $\cdot$  Вт $^{-1}$   $\cdot$  м $^2$ ]. Оно найдено при анализе среднегодовых значений характеристик на большом интервале времени. Скорость реакции ЗКС в докладе [8] не оценивалась.

К настоящему времени выполнены исследования характеристик ЗКС, использующие ряды среднемесячных значений данных. Они основывались на анализе автокорреляционной функции ее выходного сигнала – аномалии глобально усредненных среднемесячных значений приповерхностной температуры  $\Delta T(t)$ . Кроме того, рядом авторов для описания аномалии  $\Delta T(t)$  применялись модели множественной регрессии, которые наряду с вариацией солнечной постоянной  $\Delta I(t)$  учитывали влияние аэрозоля, связанного с вулканическими извержениями, и изменения

температуры океана в регионе действия явления Эль-Ниньо.

Результаты независимых оценок постоянной времени ЗКС  $\tau$  и чувствительности  $\lambda$  приведены в таблице, в последнем столбце которой даны рассчитанные нами значения эффективной теплоемкости на единицу площади поверхности Земли  $C$ , проявляющей себя при радиационных воздействиях с характерным временем  $\tau$ . Описание методов, использованных разными авторами, можно найти в цитированной литературе. Сопоставление методик и их критический анализ приведены в работе [7].

Из анализа таблицы можно сделать вывод, что разные авторы и методики дают сравнительно близкие значения чувствительности  $\lambda$ , которые согласуются между собой в пределах оцененных погрешностей. Однако оценки времени реакции ЗКС различаются на два порядка. По-видимому, эти различия обусловлены методическими погрешностями [7]. Применяемый нами подход, основанный на восстановлении  $h(t)$ , отличается доказанной сходимостью решения к точному и его устойчивостью по отношению к случайному шуму. Поэтому полученные результаты могут рассматриваться как достаточно надежные.

#### Заключение

Использованная 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.

По результатам восстановления  $h(t)$  на интервалах времени длиной до 100 мес. получена величина постоянной времени  $\tau = 1.305 \pm 0.026$  мес. и чувствительность к радиационному воздействию  $\lambda = 0.320 \pm 0.074$  К  $\cdot$  Вт $^{-1}$   $\cdot$  м $^2$ . Отметим, что данное значение  $\tau$  определяет скорость реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие. О времени установления системы, которое из-за влияния океана должно существенно превышать длину

Характеристики земной климатической системы, полученные разными авторами

Авторы	Постоянная времени $\tau$	Чувствительность $\lambda$ , К $\cdot$ Вт $^{-1}$ $\cdot$ м $^2$	Теплоемкость $C$ , МДж $\cdot$ К $^{-1}$ $\cdot$ м $^{-2}$
Douglass et al. [3]	3 мес.	$0.63 \pm 0.13$	$12.5 \pm 2.6$
Schwartz [10]	$5 \pm 1$ год	$0.30 \pm 0.14$	$530 \pm 350$
Scafetta [11]	$0.4 \pm 0.1$ и $8.7 \pm 2$ года	0.5	$25.2 \pm 6.3$ $550 \pm 130$
Schwartz [12]	$8.5 \pm 2.5$ года	$0.51 \pm 0.26$	$530 \pm 420$
Lockwood [5]	0.78 года	0.30	82.1
Bogdanov et al. [6]	$1.04 \pm 0.17$ мес.	$0.41 \pm 0.05$	$6.7 \pm 1.9$
Наша оценка	$1.305 \pm 0.026$ мес.	$0.320 \pm 0.074$	$10.7 \pm 2.6$



анализируемых рядов, мы ничего не можем сказать. Соответственно полученное значение чувствительности справедливо для воздействий продолжительностью до нескольких месяцев. При этом коэффициент положительной обратной связи оказывается равным  $f = 1.07 \pm 0.25$ , а эффективная теплоемкость ЗКС на единицу площади  $C = 10.7 \pm 2.6$  МДж  $\cdot$  К $^{-1}$   $\cdot$  м $^{-2}$  и практически совпадает с теплоемкостью атмосферы. Можно сделать вывод, что реакция ЗКС на изменение радиационного воздействия на таком интервале времени обусловлена атмосферными процессами.

Поскольку  $h(t)$  является неотрицательной функцией, то увеличение интервала ее интегрирования может приводить только к росту  $k$  и, соответственно, к росту чувствительности  $\lambda$ . Таким образом, полученную нами оценку  $\lambda$  следует рассматривать как нижний предел истинного значения.

Интересно будет применить данную методику к реконструированным рядам данных изменений солнечной постоянной и глобальной температуры. Это даст возможность получить информацию об импульсной передаточной характеристике, чувствительности и эффективной теплоемкости ЗКС на больших интервалах времени.

#### Библиографический список

1. Бudyko M. I. Тепловой баланс земной поверхности. Л. : Гидрометеоздат, 1956. 255 с.
2. Винников К. Я. Чувствительность климата. Эмпирические исследования закономерностей современных изменений климата. Л. : Гидрометеоздат, 1986. 224 с.
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, 2004. P. 1–16 [Электронный ресурс]. URL: <http://arxiv.org/abs/physics/0411002> (дата обращения: 05.08.2019).
4. Vardavas I. M., Taylor F. W. Radiation and Climate. New York : Oxford University Press, 2007. 492 p.
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. 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.
7. Богданов М. Б., Ефремова Т. Ю., Катрущенко А. В. Оценка характеристик земной климатической системы по ее реакции на изменение солнечной постоянной // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2012. Т. 12, вып. 1. С. 3–8.
8. 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.
9. Дымников В. П., Лыкозов В. Н., Володин Е. М. Моделирование климата и его изменений: современные проблемы // Вестник РАН. 2012. Т. 82, № 3. С. 227–336.
10. Schwartz S. E. Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. D24S05. DOI: 10.1029/2007JD008746
11. 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: 10.1029/2007JD009586
12. 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: 10.1029/2008JD009872
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. 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.
17. 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. DOI: 10.7289/V5FN144H [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaaglobaltemp/operational/timeseries/> (дата обращения: 15.07.2018).
18. 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. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00241.1
19. Мoнин А. С. Введение в теорию климата. Л. : Гидрометеоздат, 1982. 246 с.

#### Образец для цитирования:

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>

#### Cite this article as:

Bogdanov M. B., Cherviakov M. Yu. Estimation of Response Time and Sensitivity of the Earth's Climate System to Radiative Forcing. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2019, vol. 19, iss. 4, pp. 216–223 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-216-223>