



ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.58

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ЕЕ РЕАКЦИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ПОСТОЯННОЙ

М. Б. Богданов, Т. Ю. Ефремова, А. В. Катрущенко

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

В результате восстановления импульсной передаточной характеристики земной климатической системы (ЗКС) показано, что скорость ее реакции может быть охарактеризована эквивалентной постоянной времени $1,04 \pm 0,17$ месяце. Чувствительность ЗКС к изменению радиационного воздействия оказывается равной $0,41 \pm 0,05 \text{ K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$, что дает коэффициент положительной обратной связи $1,37 \pm 0,17$. Эффективная теплоемкость ЗКС на единицу площади, проявляющая себя при радиационном воздействии длительностью порядка постоянной времени, равна $6,7 \pm 1,9 \text{ МДж} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ и составляет около 0,64 теплоемкости атмосферы. Это говорит о том, что реакция ЗКС на изменение радиационного воздействия на таких интервалах времени обусловлена атмосферными процессами.

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

Estimation of Characteristics of the Earth's Climate System from its Response to Changes in Solar Constant

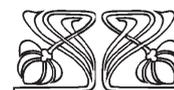
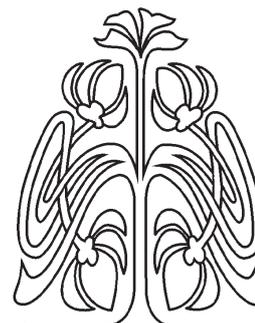
M. B. Bogdanov, T. Yu. Efremova, A. V. Katrushchenko

Restoration of the impulse response of the Earth's climate system (ECS) showed that the rate of its reaction can be characterized by an equivalent time constant of 1.04 ± 0.17 months. Sensitivity of ECS to changes in radiative forcing is equal to $0.41 \pm 0.05 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \text{m}^2$, which gives the positive feedback factor 1.37 ± 0.17 . Effective heat capacity of ECS per unit area, which manifests itself in the radiative forcing duration of the order time constant, equal to $6.7 \pm 1.9 \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ and is about 0.64 the heat capacity of the atmosphere. This suggests that the reaction of ECS on the change in radiative forcing at similar time intervals due to the atmospheric processes.

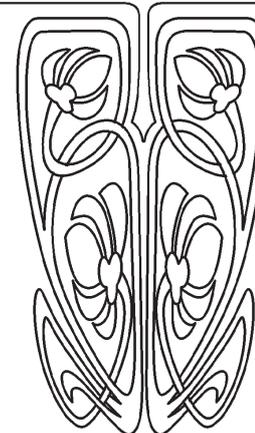
Key words: earth's climate system, impulse response, time constant, sensitivity, heat capacity.

Введение

Исследование свойств земной климатической системы (ЗКС) в последнее время привлекает к себе большое внимание в связи с изучением проблемы глобального изменения климата [1]. Многими авторами предпринимались попытки оценки характерного времени реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие и ее чувствительности к этому воздействию. Для решения этой задачи анализировалась автокорреляционная функция выходного сигнала ЗКС – аномалий глобально усредненных среднемесячных значений приповерхностной температуры Земли $\Delta T(t)$ [2–4], использовались модели множественной регрессии, в которых наряду с сигналом на входе ЗКС – изменением солнечной постоянной $\Delta I(t)$, а также учитывались влияние аэрозоля, связанного с вулканическими извержениями, и изменения температуры океана в регионе действия явления Эль-Ниньо [5, 6]. Скорость реакции ЗКС может быть охарактеризована постоянной времени τ , а изменение глобальной температуры – чувствительностью к радиационному воздействию на верхней границе атмосферы (ВГА) λ . Знание величин τ и λ позволяет, при определенных предположениях, оценить эффектив-



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





ную теплоемкость той части глобальной системы «суша–океан–атмосфера», которая ответственна за реакцию на изменение радиационного воздействия с характерным временем τ [2].

Нами была предложена методика восстановления импульсной передаточной характеристики $h(t)$ ЗКС, рассматриваемой как инвариантная во времени линейная система, и получены оценки $h(t)$ на интервалах времени длиной до 100 мес. [7]. Знание $h(t)$ полностью характеризует линейную систему и, в частности позволяет найти значения ее параметров τ и λ . Целью данной работы является оценка эффективной теплоемкости ЗКС и коэффициента обратной связи, влияющего на величину чувствительности системы.

Уравнение баланса лучистой энергии и его следствия

Условие баланса лучистой энергии, которое при глобальном осреднении выполняется с высокой точностью, предполагает равенство энергии солнечного излучения, поглощенной единицей поверхности Земли в единицу времени J , энергии длинноволновой радиации E , излученной этой площадкой за то же время. Обозначим через R расстояние от центра Земли до ВГА. Учитывая, что при вращении планеты солнечное излучение, поглощенное площадью πR^2 , перераспределяется на всю площадь ВГА $4\pi R^2$, и обозначив через β среднее значение альбедо Земли, получим для среднего расстояния нашей планеты от Солнца $J = I(1-\beta)/4$, где I – солнечная постоянная. В свою очередь, предполагая, что поверхность с температурой T излучает как абсолютно черное тело с поправкой на излучательную способность δ , имеем $E = \delta\sigma T^4$, где σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Очевидно, что нарушение баланса лучистой энергии – отличие от нуля разности $J - E$ – будет вызывать изменение количества теплоты Q в ЗКС, рассчитанное на единицу площади: $J - E = dQ/dt$. Учитывая связь изменения Q с изменением температуры $dQ/dt = C dT/dt$, где C – средняя теплоемкость ЗКС на единицу площади, запишем уравнение баланса в виде

$$C \frac{dT}{dt} = \frac{I(1-\beta)}{4} - \delta\sigma T^4. \quad (1)$$

Как следует из уравнения (1), нарушение баланса энергии вызывает изменение глобальной температуры, знак которого определяется знаком баланса, а скорость зависит от величины теплоемкости.

При нулевом балансе лучистой энергии дифференцирование его условия дает $dJ = 4\delta\sigma T^3 dT$. Отсюда, учитывая равенство $J = \delta\sigma T^4$, можно получить выражение для чувствительности ЗКС к радиационному воздействию на ВГА

$$\lambda_0 = \frac{dT}{dI} = \frac{T}{(1-\beta)I}. \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение (1) описывает линейную систему первого порядка, имеющую постоянную времени

$$\tau_0 = C\lambda_0. \quad (3)$$

Приняв для солнечной постоянной значение $I = 1366 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, альбедо $\beta = 0.30$ и температуру поверхности $T = 288 \text{ К}$, из выражения (2) можно найти величину чувствительности $\lambda_0 = 0.30 \text{ К}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$. Однако результаты исследований дают, как правило, заметно большее значение этой характеристики. Так, по данным IPCC 2007 [1], чувствительность может быть оценена как $0.8 \pm 0.4 \text{ К}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2$. Такое увеличение чувствительности ЗКС обычно объясняется наличием положительной обратной связи. Из уравнения (1) видно, что подобная обратная связь может заключаться в уменьшении излучательной способности δ и (или) уменьшении альбедо β с ростом температуры. Изменения δ и β такого характера находят естественное объяснение [8]. В первом приближении наличие обратной связи можно учесть, введя ее коэффициент f . Тогда эффективное значение чувствительности оказывается равным

$$\lambda = f\lambda_0. \quad (4)$$

При этом сохранение теплоемкости ЗКС в формуле (3) требует соответствующего изменения постоянной времени $\tau = f\tau_0$. Согласно данным работы [2], коэффициент обратной связи описывается выражением

$$f = \left(1 - \frac{1}{4} \frac{d \ln(1-\beta)}{d \ln T} + \frac{1}{4} \frac{d \ln \delta}{d \ln T} \right)^{-1}.$$

Таким образом, оценка по результатам наблюдений параметров ЗКС τ и λ позволяет определить величину ее эффективной теплоемкости C и коэффициент обратной связи f .

Методика восстановления импульсной передаточной характеристики

Рассмотрим ЗКС как инвариантную во времени линейную систему, входом которой является изменение солнечной постоянной ΔI , а выходом – аномалии глобальной приповерхностной температуры ΔT . При этом суммарное воздействие всех других факторов, оказывающих влияние на глобальную температуру (флуктуации облачности, изменение концентрации аэрозоля и т. п.), рассматривается как случайный шум. Сигналы на входе $\Delta I(t)$ и выходе $\Delta T(t)$ такой системы связаны интегральным уравнением типа свертки

$$\Delta T(t) = \int_0^{\infty} h(\xi) \Delta I(t - \xi) d\xi, \quad (5)$$



где $h(t)$ – импульсная передаточная характеристика системы. При известных сигналах на входе и выходе системы нахождение $h(t)$ сводится к решению некорректно поставленной обратной задачи для интегрального уравнения (5). Необходимым условием решения подобных задач является использование априорной информации о функции $h(t)$ [9].

Для устойчивых систем модуль $h(t)$ быстро убывает с ростом t . Будем считать, что эта функция отлична от нуля на интервале $[0, a]$, соответственно заменим бесконечный верхний предел интеграла (5) конечной величиной a . Если левая часть уравнения (5) 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 $t \geq 0$

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

где τ – постоянная времени, а k – коэффициент усиления системы. Она представляет собой выпуклую вниз монотонно невозрастающую неотрицательную функцию. В случае если ЗКС состоит из двух или более параллельно включенных независимых систем первого порядка с разными значениями τ , результирующая характеристика $h(t)$ будет суммой спадающих экспонент, которая также является выпуклой вниз монотонно невозрастающей неотрицательной функцией. Множество функций подобного вида представляет собой компакт [10]. Как известно, обратная задача для интегрального уравнения (5) на компактном множестве функций является корректной [10] и ее приближенное решение $h_m(t)$ может быть получено минимизацией функционала невязки

$$\rho[h, \Delta T, \Delta I] = \int_c^d \left\{ \Delta T(t) - \int_0^a h(\xi) \Delta I(t - \xi) d\xi \right\}^2 dt. \quad (6)$$

При стремлении к нулю погрешностей задания входного и выходного сигналов системы функция $h_m(t)$ сходится к точному решению задачи $h(t)$ на всем интервале определения за исключением точек разрыва [10]. Следует отметить, что сходимость гарантируется при любом характере возмущения левой части уравнения (5). Оно вовсе не обязательно должно быть чисто случайным. Поэтому наличие циклических глобальных процессов, подобных явлению Эль-Ниньо, не может повлиять на результат восстановления. 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.

Таким образом, находя экстремаль функционала (6) на множестве выпуклых вниз неотрицательных функций, отвечающем физике нашей задачи, мы получаем устойчивую оценку импульс-

ной 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 [10,11].

Полученные результаты

Для восстановления $h(t)$ мы использовали композитный ряд среднемесячных значений солнечной постоянной PMOD TSI [12] с января 1976 г. по май 2009 г. Полное число отсчетов составляет $N = 401$. Входной сигнал ЗКС $\Delta I(t)$ получался вычитанием из данного ряда среднего значения 1365.9175 Вт·м⁻². В качестве выходного сигнала ЗКС был взят ряд аномалий глобально усредненных среднемесячных значений приповерхностной температуры $\Delta T(t)$ (суша + океан) ERSSTv3b [13] за тот же интервал времени, из которого были вычтены линейный тренд и сезонные гармоники изменения температуры. Подробное описание исходных рядов и методики численного решения задачи приведено в работе [7].

Мы провели восстановление $h(t)$ на интервалах разной длины с максимальным значением $a = 100$ мес. В каждом случае был достигнут точный минимум функционала (6). Полученные результаты оказались достаточно неожиданными: во всех случаях ненулевыми были только несколько первых отсчетов передаточной характеристики. Функция $h_m(t)$ быстро убывает с ростом аргумента, и значение эквивалентной постоянной времени τ , за которое можно приближенно принять момент t , когда $h_m(t)$ уменьшается в $e = 2.718$ раз от максимума, составляет около одного месяца. Оценка погрешности находилась путем сравнения между собой решений, полученных для интервалов $[0, a]$ разной длины. Такая процедура, проведенная для десяти решений с верхней границей интервала a изменяющейся от 10 до 100 мес., позволила найти среднюю величину эквивалентной постоянной времени $\tau = 1.04 \pm 0.17$ мес.

Как уже отмечалось выше, равномерная сходимость $h(t)$ к точному решению задачи доказана для любого характера возмущений аномалий температуры. Тем не менее естественно ожидать, что погрешность оценки $h(t)$ будет меньше в случае нулевого среднего и симметричного распределения погрешностей исходных данных. Среднее значение остаточных отклонений оказалось равным 0.00 К, а стандартное отклонение – 0.11 К. Мы провели проверку гипотезы о нормальности распределения остаточных отклонений аномалий температуры, соответствующих восстановленной импульсной передаточной характеристике, с использованием критерия Колмогорова–Смирнова. Найденное значение параметра Колмогорова оказалось равным 0.95, в то время как критическое значение 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 факторов, влияющих на глобальную температуру, представляется достаточно обоснованным.

Знание импульсной передаточной характеристики ЗКС позволяет 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

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

и по результатам наших расчетов численное интегрирование решений методом трапеций дает среднее значение $k = 0.071 \pm 0.009 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$. В свою очередь, знание k позволяет найти значение чувствительности ЗКС к изменению радиационного воздействия на ВГА

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

где β – среднее значение альбедо Земли. Принимая $\beta = 0.30$, получим среднюю величину чувствительности $\lambda = 0.41 \pm 0.05 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$. Применение формулы (4) для найденного нами значения λ дает коэффициент обратной связи ЗКС $f = 1.37 \pm 0.17$, что существенно меньше величины $f = 2.7 \pm 1.3$, используемой IPCC 2007 [1].

Найденные нами величины τ и λ , связанные соотношением (3), позволяют оценить эффективную теплоемкость ЗКС на единицу площади S , проявляющую себя при радиационном воздействии с характерным временем τ . Приняв среднюю продолжительность месяца 30.5 сут, получим $S = 6.7 \pm 1.9 \text{ МДж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^2$. Согласно Монину [14], полная теплоемкость земной атмосферы составляет $5.32 \times 10^{15} \text{ МДж} \cdot \text{К}^{-1}$. Разделив эту величину на площадь поверхности Земли, найдем $C_{\text{атм}} = 10.4 \text{ МДж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^2$. Таким образом, эффективная теплоемкость ЗКС оказывается равной $S = 0.64 C_{\text{атм}}$. Это говорит о том, что реакция ЗКС на изменение солнечной постоянной на рассматриваемом интервале времени может быть объяснена атмосферными процессами, которые даже не охватывают всю массу атмосферы.

Сравнение результатов с данными независимых исследований

Представляет интерес сравнение полученных результатов с данными независимых исследований. Schwartz [2] предложил метод оценки постоянной времени τ ЗКС, основанный на анализе ее выход-

ного сигнала – аномалий глобально усредненных среднемесячных значений приповерхностной температуры $\Delta T(t)$ с 1880 по 2004 г. Рассмотренное им уравнение энергетического баланса Земли (1) предполагает для ЗКС модель авторегрессии первого порядка, и при наличии на входе системы белого шума автокорреляционная функция значений $\Delta T(t)$ должна иметь вид спадающей экспоненты, скорость уменьшения которой определяется величиной τ . Анализ автокорреляции дал оценку $\tau = 5 \pm 1$ год, что соответствует значению чувствительности ЗКС $\lambda = 0.30 \pm 0.14 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$ [2].

Эти результаты были подвергнуты критике в работах ряда авторов, ссылки на которые приведены в статье [4]. Основным замечанием было указание на то, что для сравнительно коротких временных рядов данный метод дает сильно смещенную оценку τ и то, что реакция ЗКС не может быть охарактеризована только одной постоянной времени. В частности, Scafetta [3] показал, что автокорреляция значений $\Delta T(t)$ лучше представляется суммой двух спадающих экспонент с постоянными времени 0.4 ± 0.1 и 8.7 ± 2.0 года. Отчасти учтя эти замечания, Schwartz [4] получил новые значения $\tau = 8.5 \pm 2.5$ года и $\lambda = 0.51 \pm 0.26 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$. Он также согласился с возможной неполнотой описания ЗКС одной линейной системой первого порядка и привел пример электрической схемы, моделирующей поведение ЗКС. Схема включает две слабо связанные RC-цепочки 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 время установления – τ_2 . В случае ЗКС величина эквивалентная второй постоянной времени τ_2 может достигать 3000 лет [4], что связано с большой тепловой инерцией глубинных вод океана.

Анализ автокорреляции выходного сигнала ЗКС основан на предположении наличия на ее входе белого шума, что довольно далеко от действительности. В частности, в изменении солнечной постоянной четко прослеживается 11-летний цикл [12]. Можно показать, что данному методу оценки постоянной времени ЗКС присущ еще один принципиальный недостаток. Метод неявно предполагает отсутствие шума в исходных данных $\Delta T(t)$. Очевидно, что до начала спутниковых измерений глобальной температуры погрешность оценок $\Delta T(t)$ была достаточно велика, особенно для использованных в работах [2–4] данных XIX века. Предполагая, что связанный с этой погрешностью случайный шум является аддитивным и имеет достаточно широкую полосу частот, можно ожидать появления значительного шумового пика автокорреляционной функции с максимумом при нулевом значении запаздывания. Такой пик хорошо заметен на соответствующих графиках в работах [2–4], его наличие не позволяет надежно оценивать значения τ менее одного года.

В работе [5] для описания среднемесячных значений аномалий глобальной температуры $\Delta T(t)$



с 1979 по 2004 г. использовалась модель множественной регрессии, в которой наряду с $\Delta I(t)$ (ряд PMOD TSI) учитывались влияние аэрозоля, связанного с вулканическими извержениями, и изменения температуры океана в регионе действия явления Эль-Ниньо. Полученные величины оказались равными $k = 0.10 \pm 0.02 \text{ K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$ и $\lambda = 0.63 \pm 0.13 \text{ K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$. Для постоянной времени ЗКС авторы работы [5] приняли значение $\tau = 3$ мес. При этом они ссылались на результаты своих предыдущих исследований времени релаксации для широтных зон Земли шириной 30° , давших для разных зон значения τ от 1 до 2 мес.

В модели множественной регрессии для значений $\Delta T(t)$, использованной Lockwood [6], рассматривались те же три фактора, влияющие на ЗКС, что и в работе [5], но было дополнительно введено три свободных параметра – постоянные времени для каждого фактора. Оптимальное значение коэффициента k для композитного ряда измерений солнечной постоянной PMOD TSI оказалось равным $0.0507 \text{ K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$, а для ряда ACRIM TSI – $0.0533 \text{ K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$. Значения постоянных времени τ для этих рядов равны соответственно 0.80 и 0.75 года. Оценки коэффициента k дают среднюю величину чувствительности $\lambda = 0.30 \text{ K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$. Необходимо отметить, что использованная в работе [6] методика не позволяет оценить погрешности параметров модели.

К недостаткам методики применения модели множественной регрессии можно отнести неоднозначность выбора переменных. Наряду с

рассмотренными факторами для ЗКС характерно наличие и ряда других циклических изменений (североатлантическое колебание, квазидвухлетний цикл и т. п.). Кроме того, очевидно, что изменения солнечной постоянной и температуры океана в регионе действия явления Эль-Ниньо не являются независимыми переменными.

Результаты независимых оценок характеристик ЗКС приведены в таблице, в последнем столбце которой даны рассчитанные по формуле (3) значения эффективной теплоемкости, проявляющей себя при радиационных воздействиях с характерным временем τ . Из анализа этой таблицы можно сделать вывод, что разные авторы и методики дают сравнительно близкие значения чувствительности λ , которые согласуются между собой в пределах оцененных погрешностей. Однако оценки времени реакции ЗКС различаются на два порядка. По-видимому, эти различия обусловлены указанными выше методическими погрешностями. Недостатком нашего подхода является сравнительно небольшая длина интервала, на котором проводится поиск решения. Однако она вполне достаточна для анализа характеристики линейной системы с постоянной времени около одного года. Тем не менее наши оценки $h(t)$ не подтверждают значения τ , полученные Lockwood [6], и лучше согласуются с данными работы [5]. Оценки теплоемкости по данным всех других авторов превышают $C_{\text{атм}}$, что предполагает участие в процессе реакции на радиационное воздействие и других компонентов ЗКС, в частности верхних слоев океана.

Характеристики земной климатической системы, полученные разными авторами

Авторы	Постоянная времени τ	Чувствительность λ , $\text{K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$	Теплоемкость C , $\text{МДж} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$
Schwartz [2]	5 ± 1 г.	0.30 ± 0.14	530 ± 350
Scafetta [3]	0.4 ± 0.1 г. и 8.7 ± 2.0 г.	0.5	25.2 ± 6.3 550 ± 130
Schwartz [4]	8.5 ± 2.5 г.	0.51 ± 0.26	530 ± 420
Douglass et al. [5]	3 мес.	0.63 ± 0.13	12.5 ± 2.6
Lockwood [6]	0.78 г.	0.30	82.1
Наша оценка	1.04 ± 0.17 мес.	0.41 ± 0.05	6.7 ± 1.9

Заключение

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

Результаты восстановления $h(t)$ на интервалах времени длиной до 100 мес. дают величину эквивалентной постоянной времени $\tau = 1.04 \pm 0.17$ мес. и чувствительность $\lambda = 0.41 \pm 0.05 \text{ K} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$. Отметим еще раз, что данное значение τ определяет скорость реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие. О времени установления системы,

которое должно существенно превышать длину анализируемых рядов, мы ничего не можем сказать. Соответственно полученное значение чувствительности справедливо для воздействий продолжительностью до нескольких месяцев. При этом коэффициент положительной обратной связи равен 1.37 ± 0.17 , а эффективная теплоемкость ЗКС на единицу площади равна $6.7 \pm 1.9 \text{ МДж} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ и составляет около 0.64 теплоемкости атмосферы. Поэтому можно сделать вывод, что реакция ЗКС на изменение радиационного воздействия на таком интервале времени обусловлена атмосферными процессами, которые даже не охватывают всю массу атмосферы.

Поскольку $h(t)$ является неотрицательной функцией, то увеличение интервала ее интегрирования может приводить только к увеличению k



и соответственно к росту чувствительности λ . Поэтому полученную нами оценку λ следует рассматривать как нижний предел истинного значения.

Представляет интерес применение данной методики 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. Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon et al. Cambridge, 2007. 996 p.
2. Schwartz S. E. Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. D24S05, doi:10.1029/2007JD008746.
3. 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, doi:10.1029/2007JD009586.
4. 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, doi:10.1029/2008JD009872.
5. 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: 18.05.2011).

6. 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.

7. Богданов М. Б., Ефремова Т. Ю., Катрущенко А. В. Исследование реакции земной климатической системы на изменение солнечной постоянной // Погода и климат: новые методы и технологии исследований (к 50-летию организации кафедры метеорологии и охраны атмосферы в Пермском государственном университете). Пермь, 2010. С. 49–52.

8. Кислов А. В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. М., 2001. 351 с.

9. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.; 1979. 142 с.

10. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М., 1983. 200 с.

11. Гончарский А. В., Черепашук А. М., Ягола А. Г. Некорректные задачи астрофизики. М., 1985. 352 с.

12. 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.

13. 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.

14. Монин А. С. Введение в теорию климата. Л., 1982. 246 с.

УДК [502/504:911.5](470.44)

САРАТОВСКОЕ ПРИВОЛЖЬЕ: ЛАНДШАФТНАЯ СТРУКТУРА И СОВРЕМЕННОЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

В. З. Макаров, А. Н. Чумаченко, А. Н. Башкатов, В. А. Гусев, Ю. В. Волков, М. Ю. Проказов, А. В. Фёдоров, В. А. Данилов, В. А. Затонский



Саратовский государственный университет
E-mail: makarovvz@rambler.ru

Saratov Privolzhie: Landscape Structure and Modern Geoeological State

V. Z. Makarov, A. N. Chumachenko, A. N. Bashkatov, V. A. Gusev, Yu. V. Volkov, M. Yu. Prokazov, A. V. Fedorov, V. A. Danilov, V. A. Zatonskiy

В статье дается определение понятию «Саратовское Приволжье» как геотории шириной в 60 км, включающей правую и левобережные приволжские территории и акваторию Волгоградского и Саратовского водохранилищ. Это наиболее хозяйственно освоенная и вместе с тем рекреационно ценная часть Саратовской области. Рассмотрена ландшафтная структура саратовского правобережного Приволжья (Предволжья) на уровне типов ландшафтных местностей. Выявлены наиболее характерные ландшафтные процессы и дана качественная оценка геоэкологической обстановки в каждом из четырёх типов местности.

The article represents concept definition of «Saratov Privolzhie» as a geotopia 60 km wide and including right and left Volga bank territories and Volgograd and Saratov storage ponds water area. This is the most economic completed but also recreation important part of Saratov region. Landscape structure of Saratov right bank of Privolzhie (Predvolzhie) is considered up to the level of landscape locality. The most typical landscape processes and qualitative assessment of geoeological conditions in each of all four landscape localities are detected.

Ключевые слова: саратовское Приволжье, ландшафтная структура саратовского Предволжья, процессы ландшафтогенеза, геоэкологическая оценка природных и природно-антропогенных процессов.

Key words: Saratov Privolzhie, landscape structure of Saratov Povolzhie, landscape genesis processes, geoeological estimation of natural an natural-anthropogenic processes.