

М.А. Гусакова, Л.Н. Карлин

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КЛИМАТООБРАЗУЮЩИХ
ФАКТОРОВ НА РАДИАЦИОННЫЕ ПОТОКИ В АТМОСФЕРЕ
И МЕЖГОДОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГЛОБАЛЬНОЙ
ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА**

М.А. Gusakova, L.N. Karlin

**THE ASSESSING THE CONTRIBUTION OF FACTORS AFFECTING
CLIMATE CHANGE IN ATMOSPHERIC RADIATION FLUXES
AND INTERANNUAL CHANGES IN THE GLOBAL SURFACE
AIR TEMPERATURE**

Рассматривается климат Земли и причины его изменчивости. Анализируются влияние климатообразующих факторов в межгодовую изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха и радиационных потоков в атмосфере. На основе разработанной климатической модели предложены сценарии будущих изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха.

Ключевые слова: климат, климатическая изменчивость, глобальная приповерхностная температура воздуха.

The climate of the Earth and the reasons of climate variability are considered. The influence of factors affecting climate change in interannual variability of global surface air temperature and atmospheric radiation fluxes is analyzed. The scenarios of future global surface air temperature variability are proposed.

Key words: climate, climate variability, global surface air temperature.

Введение

В современном мире исследованию изменений климата уделяется большое внимание. Чтобы понять причины изменения климата и создать средства для его прогнозирования, необходимо создание совершенных моделей, способных учитывать различные влияющие факторы и реакцию на внешние воздействия. На сегодняшний день в мире существует огромное многообразие климатических моделей, которые можно разделить на четыре класса: простые климатические модели, модели промежуточной сложности, модели общей циркуляции атмосферы, сложные трехмерные модели совместной циркуляции атмосферы и океана [5, 7]. Реализация этих моделей часто дает противоречивые результаты. При этом в сложных моделях трудно проследить причинно-следственные связи, обуславливающие изменения климата, что делает практически невозможным раскрыть причину расхождений в результатах. В отличие от сложных моделей, простые модели, описывающие климатическую систему с помощью небольшого количества параметров, можно использовать для качественного выяснения возможной роли тех или иных климатических факторов, поиска положительных и отрицательных обратных связей, для оценки влияния на климат изменчивости концентрации парниковых газов в атмосфере. Одним из таких параметров может служить глобальная приповерхностная температура воздуха Земли (ПТВ).

Климатические модели

На сегодняшний день при прогнозировании будущих климатических изменений чаще всего используются сложные трехмерные модели совместной циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), занимающие высшую ступень в иерархии климатических моделей [16]. Модели общей циркуляции атмосферы и океана охватывают динамические компоненты, описывающие атмосферные, океанические и наземные процессы, морской лед и др. Однако, многие процессы в атмосфере и океане до сих пор являются малоизученными, поэтому для их описания в моделях используются параметризации. К таким процессам относятся формирование облачности, осадков, перемешивание океана вследствие волновых процессов, формирование водных масс [7, 16]. Не смотря на то что с каждым годом модели данного класса совершенствуются, они по-прежнему показывают расхождения в результатах. По последним данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата IPCC [11] существует некоторая неопределенность не только в будущих оценках изменчивости глобальной температуры, но и в воспроизведении современных значений глобальной приповерхностной температуры воздуха (рис. 1).

Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005

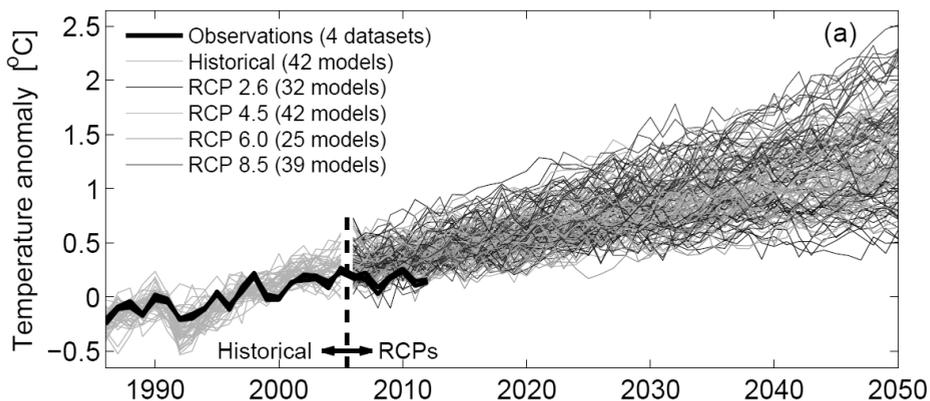


Рис. 1. Тенденции изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха согласно сценариям IPCC [11]

Для воспроизведения глобальной приповерхностной температуры воздуха с 1986 по 2005 г. IPCC использовалось 42 различных модели. Однако, как видно из рис. 1, хоть модели и воспроизводят тенденцию наблюдаемых изменений, рассчитанные значения глобальной ПТВ имеют существенные отличия от фактической температуры. Так, в 1992–1994 гг. почти все модели показали занижение глобальной ПТВ, достигая максимального отклонения от фактической температуры в $0,3^\circ$. В период с 1999 по 2005 г. почти все модели показали завышение глобальной ПТВ, достигая максимального отклонения от фактической температуры в $0,4^\circ$.

Одной из главных причин различий в будущих оценках изменений климата, рассчитанных по моделям МОЦАО можно считать неопределенность параметризации [11, 16].

Так как простые климатические модели можно использовать для оценки влияния отдельных климатообразующих факторов на изменчивость глобальной температуры, то целью данной работы является создание однопараметрической модели, учитывающей влияние основных климатообразующих факторов, для оценки будущих изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 г.

Простая однопараметрическая модель эволюции глобальной приповерхностной температуры воздуха с параметризациями глобального альbedo и уходящего длинноволнового излучения

Однопараметрические модели, направленные на изучение вклада климатообразующих факторов, основываются на энергетическом балансе Земли. Если представить, что радиационное равновесие достигнуто, то

$$\frac{F_s(1-A)}{4} = \sigma T_E^4, \quad (1)$$

где F_s – приток солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы, Вт/м²; A – глобальное альbedo; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж·с⁻¹·м⁻²·К⁻⁴; T_E – эффективная температура Земли, К.

Лучистая энергия Солнца является практически единственным источником энергии, за счет которой совершаются атмосферные движения и происходят другие разнообразные процессы в атмосфере. Часть приходящей солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы, отражается от частиц аэрозолей, облаков, земной и водной поверхности [4]. Для расчета оценки влияния вышеперечисленных факторов на изменчивость отраженной коротковолновой радиации можно использовать различные параметризации.

Так, например, найденные связи между значениями отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации [12] и значениями глобальной облачности [12], аэрозольной оптической толщиной [12] и альbedo поверхности Земли [12] позволили сделать вывод о наличии зависимостей между этими параметрами, близких к линейным. На основании полученных зависимостей была создана параметризация для расчета оценки вкладов каждой из этих характеристик в межгодовую изменчивость отраженной коротковолновой радиации [15]. За период с 2001 по 2010 г. вклад облачности менялся от 15 до 89 % от общего количества отраженной коротковолновой радиации, вклад альbedo поверхности Земли – от 1 до 71 %, а на вклад аэрозолей пришлось от 1 до 52 %. В среднем за период 2001–2010 г. на облачность пришлось около 73 %, в то время как вклад аэрозолей составил 14 %. Отражение от поверхности Земли в целом составляло около 13 % от общего количества отраженной радиации.

Изменчивость глобальной ПТВ зависит от количества отраженной коротковолновой радиации в космическое пространство, с которым прямо связано значение глобального альбедо. Известно, что уменьшение глобального альбедо приводит к увеличению глобальной ПТВ. Анализ исходных спутниковых данных [12, 14] показал наличие зависимости между значениями глобального альбедо и приземной температуры, близкую к линейной. Тогда, альбедо можно представить как функцию от изменения ПТВ:

$$A = f\left(\frac{T}{T_0}\right), \quad (2)$$

где T_0 – температура в некоторый начальный момент времени, °С. После разложения функции (2) в ряд Маклорена и отсечения всех членов выше первого порядка получим простое линейное уравнение:

$$A = A_0 + C_1 * \left(1 - \frac{T}{T_0}\right), \quad (3)$$

где A_0 – альбедо в начальный момент времени; C_1 – эмпирический коэффициент.

С помощью данных по глобальной ПТВ [14] и спутниковых данных по потокам коротковолновой радиации в атмосфере [12] на основании которых были рассчитаны ежегодные значения глобального альбедо, был найден коэффициент C_1 , осредненный за десятилетний период.

Не вся приходящая солнечная радиация отражается в космическое пространство – часть энергии поглощается, в основном, поверхностью Земли и, в малой степени, атмосферными газами [4]. Поглощенное тепло идет на нагревание почвы и океанской толщи, которые становятся источниками собственного длинноволнового излучения (согласно закону Стефана-Больцмана). Часть уходящей длинноволновой радиации задерживается в атмосфере, в то время как другая часть проходит через окно прозрачности в космическое пространство. Атмосфера также излучает длинноволновую радиацию, как в космос, так и к земной поверхности (противоизлучение атмосферы). Если бы длинноволновое излучение, не задерживаясь в атмосфере, полностью уходило в космос, то глобальная ПТВ равнялась бы 253,8 К (-19,2°С) [3, 16]. Но в реальности, глобальная приземная температура намного больше. Известно, что значительная часть уходящей длинноволновой радиации остается в атмосфере благодаря парниковому эффекту, который обуславливается наличием в атмосфере парниковых газов, включая водяной пар, и облачности [8, 9].

Для расчета оценки влияния вышеперечисленных факторов в изменчивость поглощенной длинноволновой радиации можно использовать различные параметризации. Найденные связи между значениями поглощенной атмосферой длинноволновой радиации [12] и значениями глобальной облачности [12], концентрациями водяного пара [12] и других парниковых газов [10] позволили сделать вывод о наличии зависимостей между этими параметрами, близких к линейным. На основании полученных зависимостей была создана параметризация для расчета оценки вкладов каждой из этих характеристик в межгодовую из-

менчивость поглощенной длинноволновой радиации [15]. За период с 2001 по 2010 г. вклад облачности менялся от 2 до 54 % от общего количества поглощенной длинноволновой радиации, вклад водяного пара – от 11 до 85 %, а на вклад парниковых газов пришлось от 8 до 37 %. В среднем, за период 2001–2010 гг. доминирующим фактором являлся водяной пар (около 64 %), а на долю парниковых газов и облачности приходилось около 19 и 17 %.

Так как глобальная ПТВ зависит от количества поглощенной в атмосфере длинноволновой радиации, то в формуле энергетического баланса Земли (1) следует учитывать долю энергии, задерживаемую парниковыми газами, водяным паром и облачностью (δ):

$$\frac{F_s(1-A)}{4} = \sigma T^4 - \delta \sigma T^4, \quad (4)$$

где T – глобальная ПТВ в некоторый момент времени t , К.

Найденные связи между значениями глобальной ПТВ и значениями глобальной облачности [13], концентрациями водяного пара [13] и других парниковых газов [10] позволили сделать вывод о наличии зависимостей между этими параметрами, близких к линейным [2]. На основании полученных зависимостей была создана параметризация для расчета количественной оценки вкладов каждой из этих характеристик в межгодовые изменения глобальной ПТВ. Доминирующий фактор межгодовых изменений глобальной приповерхностной ПТВ отсутствует. За период 1984–2008 гг. осредненный вклад облачности и парниковых газов за вычетом водяного пара в изменения глобальной ПТВ был примерно одинаков и составил 24 и 20 % соответственно, в то время как на водяной пар пришлось около 56 %. Полученные результаты находятся в противоречии с наиболее распространенным выводом ИРСС, где считается, что главным фактором, влияющим на изменение глобальной приповерхностной температуры воздуха, являются парниковые газы (углекислый газ, метан и закись азота) [11, 16].

Для создания параметризации уходящего длинноволнового излучения были проанализированы уже полученные близкие к линейным зависимости концентрации парниковых газов, водяного пара и количества глобальной облачности от глобальной ПТВ. Представим, что доля поглощения энергии парниковыми газами, водяным паром и облачностью (δ) есть функция от температуры и концентрации парниковых газов:

$$\delta = f\left(\frac{G}{G_0}; \frac{T}{T_0}\right), \quad (5)$$

где G – концентрация парниковых газов в некоторый момент времени t , млн⁻¹. G_0 – концентрация парниковых газов в начальный момент времени, млн⁻¹.

Будем считать, что увеличение или уменьшение водяного пара и облачности в большей степени зависит от температуры, в то время как концентрация парниковых газов изменяется в зависимости от многих причин (температура воздуха, усвоение углекислого газа океаном, промышленные выбросы и т.д.). За начальные условия принимаются значения параметров различных данных (тем-

пература, приходящая солнечная радиация, парниковые газы, водяной пар, альbedo, количество облачности и др.) в момент времени (год), принятый за начальный.

После разложения функции (5) в ряд Маклорена, получим:

$$f\left(\frac{G}{G_0}; \frac{T}{T_0}\right) = f\left(\frac{G_0}{G_0}; \frac{T_0}{T_0}\right) + \left[C_3 \left[\left(\frac{G}{G_0}\right) - \left(\frac{G_0}{G_0}\right) \right] + C_2 \left[\left(\frac{T}{T_0}\right) - \left(\frac{T_0}{T_0}\right) \right] \right], \quad (6)$$

где C_3, C_2 – безразмерные коэффициенты; $f\left(\frac{G_0}{G_0}; \frac{T_0}{T_0}\right) = \delta_0$ – доля поглощения радиации при начальных условиях $f\left(\frac{G}{G_0}; \frac{T}{T_0}\right) = \delta$ – доля поглощения радиации в некоторый момент времени t . Тогда преобразуем (6):

$$\delta_t = \delta_0 + C_3 \left[\left(\frac{G}{G_0}\right) - 1 \right] + C_2 \left[\left(\frac{T}{T_0}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

при $T = T_0, \delta = \delta_0$.

В системе Земля-атмосфера неравенство потоков в формуле (1) приводит к изменению теплосодержания атмосферы Земли, которое можно представить как произведение изменения средней температуры по всей толще атмосферы (T_{cp} , К) на плотность (ρ_0 , кг/м³) и теплоемкость воздуха (C_p , Дж/(кг·К)); и на высоту атмосферы (H , м). Тогда можно написать:

$$\frac{dT_{cp}}{dt} = \frac{1}{C_p * \rho * H} \left[\frac{Fs * (1 - [A_0 + C_1 * (\frac{T}{T_0} - 1)])}{4} - (1 - \{\delta_0 + C_3 \left[\left(\frac{G}{G_0}\right) - 1 \right] + C_2 \left[\left(\frac{T}{T_0}\right) - 1 \right]\}) * \sigma * T^4 \right], \quad (8)$$

где t – время, с.

Так как в левой части уравнения температура, осредненная по всей толще атмосферы (T_{cp}), а в правой – глобальная ПТВ (T), то введем эмпирический коэффициент J . Коэффициент рассчитан с использованием вертикального профиля температуры в стандартной атмосфере [6, 17]. Тогда формула (8) будет выглядеть так:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_p * \rho * H * J} \left[\frac{Fs * (1 - [A_0 + C_1 * (\frac{T}{T_0} - 1)])}{4} - (1 - \{\delta_0 + C_3 \left[\left(\frac{G}{G_0}\right) - 1 \right] + C_2 \left[\left(\frac{T}{T_0}\right) - 1 \right]\}) * \sigma * T^4 \right] \quad (9)$$

Оценка трендов будущих изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха

Для определения эмпирических коэффициентов C_1, C_2 и C_3 в формуле (9) были использованы описанные ранее данные по температуре [14], содержанию парниковых газов [10], а также спутниковые данные солнечной радиации и альbedo за период 2001–2011 гг. [12]. Затем, с использованием метода Рунге-Кутты с автоматическим пересчетом шага, были произведены расчеты на модели и построен прогноз изменения температуры до 2030 г.

Для того чтобы проверить валидность модели, был проведен сравнительный анализ фактических данных температуры и рассчитанных на модели значе-

ний (рис. 2). Можно констатировать, что разработанная модель достаточно хорошо воспроизводит наблюдаемые изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха. Так, например, разработанная модель прогнозирует повышение глобальной приповерхностной температуры воздуха в 2013 г. Как известно, по последним данным Всемирной Метеорологической организации, 2013 г. будет одним из теплых за последнее десятилетие. При этом модель позволяет дать интерпретацию некоему парадоксу в эволюции глобальной ПТВ, неразрешимому в рамках гипотезы о доминирующем вкладе парниковых газов (за вычетом водяного пара) в ее изменчивость. Он заключен в том, что концентрация парниковых газов (за вычетом водяного пара) монотонно растет в течение рассматриваемого периода [10, 18]. В то же время в эволюции глобальной приповерхностной температуры воздуха имеют место периоды, когда ее значения уменьшались. На разработанной модели, учитывающей изменения приходящей коротковолновой радиации на верхней границе атмосферы, удастся, хотя и не всегда, воспроизвести данную особенность в эволюции глобальной приповерхностной температуры воздуха. Конечно, надо иметь в виду, что однопараметрическая модель не может рассчитать все колебания температуры воздуха, так как в ее основе заложены лишь главные климатообразующие факторы. Естественно, на кратковременные изменения глобальной ПТВ могут повлиять и непредвиденные факторы, которые невозможно учесть в моделях такого типа. К ним относятся сильнейшие извержения вулканов или явления Эль-Ниньо.

На основе модели было рассчитано два сценария изменения глобальной ПТВ до 2030 г. В основу обоих сценариев положен прогноз изменения солнечной радиации, в котором предполагается, что солнечная радиация с начала XXI в. постепенно начинает понижаться [1]. В основе первого сценария лежит предположение о постепенном увеличении парниковых газов (за исключением водяного пара), которое наблюдалось в последние десятилетия (на $1,93 \text{ млн}^{-1}$ в год) [18]. В соответствии со вторым сценарием концентрация парниковых газов, за вычетом водяного пара, остается постоянной до 2030 г. (на уровне 2011 г.).

Наши расчеты показали, что при постоянном увеличении концентрации парниковых газов на заданное значение, глобальная ПТВ будет плавно увеличиваться до 2030 г. В этом случае в 2030 г. температура воздуха может достигнуть значения $288,39 \text{ К}$ ($15,39 \text{ }^\circ\text{C}$), причем разница в температуре по сравнению с 2012 г. составит $0,64 \text{ }^\circ$. При фиксированном на уровне 2011 г. значении концентрации парниковых газов, приземная температура будет колебаться вокруг современных значений, причем в 2030 г. она составит $287,75 \text{ К}$ ($14,75 \text{ }^\circ\text{C}$), что соответствует температуре 2012 г. (рис. 2).

Выбранные условия позволили сравнить наши результаты с прогнозами изменений глобальной ПТВ, представленными ИРСС в 2013 г. (рис. 2) [11]. Все последние сценарии ИРСС предполагают повышение глобальной приповерхностной температуры воздуха к 2030 г. При этом модели ИРСС дают различные оценки повышения температуры. Считается, что минимальное значение повы-

шения температуры по сравнению с 2012 г. составит в 2030 г $0,43^{\circ}$, а максимальное $-1,53^{\circ}$. В среднем, глобальная ПТВ по прогнозам ИРСС может повыситься на $0,98^{\circ}$.

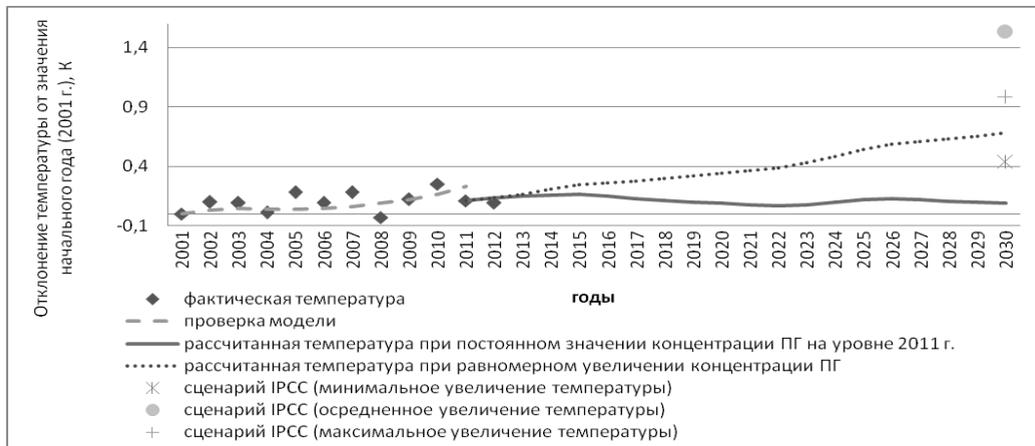


Рис. 2. Сценарии изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 г.

Приведенные данные дают основания сделать вывод о том, что наши модельные расчеты глобальной приповерхностной температуры воздуха при сохранении скорости увеличения концентраций парниковых газов в атмосфере, оказываются ниже на $0,85^{\circ}$ по сравнению с прогнозируемым ИРСС значением максимального повышения температуры и на $0,3^{\circ}$ ниже осредненного повышения температуры. При постоянном значении концентрации парниковых газов, зафиксированных на уровне 2011 г., рассчитанное нами значение глобальной приповерхностной температуры к 2030 г. должно быть ниже на $0,34^{\circ}$ по сравнению с аналогичными значениями, приведенными ИРСС. Расхождение в результатах можно объяснить тем, что в разработанной модели учитываются колебания приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации, которая в наших расчетах задавалась уменьшающейся в течение всего моделируемого периода. Напротив, эксперты ИРСС признают данный параметр незначительным.

Очевидно, что климат на Земле меняется, меняется и будет меняться. Но, изучая глобальные изменения климата, не стоит опираться только на антропогенное воздействие, обусловленное хозяйственной деятельностью человека. Существуют естественные причины изменения климата, которые вносят свои поправки в колебания климатической системы. Только комплексное изучение проблемы, учет всех составляющих климатической системы поможет наиболее качественно оценить прошлые и существующие изменения, а также дать достоверные сценарные оценки будущих изменений, которые позволят оценить последствия изменений климата.

Литература

1. Абдусаматов Х.И. Солнце диктует климат Земли. – СПб.: Logos, 2009. – 197 с.
2. Гусакова М.А., Карлин Л.Н. Влияние облачности на кратковременные климатические изменения // Уч. зап. РГГМУ, 2013, № 29, с. 95-99.
3. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем // МГУ. МАИК «Наука». – Минск: Интерпериодика, 2001.
4. Алимов А.А., Карлин Л.Н., Музалевский А.А., Самусевич И.Н., Гусакова М.А. Климат Земли: мифы и реальность // Прил. к журналу «Безопасность жизнедеятельности», 2011, № 2.
5. Логинов В.Ф. Причины и следствия климатических изменений. – Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 320 с.
6. Переведенцев Ю.П. Теория климата. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – 504 с.
7. Акентьева Е.М., Алексеев Г.В., Анисимов О.А. и др. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. – М.: Росгидромет, 2008, с. 112-213.
8. Семенов С.М. Парниковые газы и современный климат Земли. – М.: Изд. центр «Метеорология и гидрология», 2004. – 175 с.
9. Attribution of the present-day total greenhouse effect. G.A. Schmidt, R.A. Ruedy, R.L. Miller, A.A. Lacis // J. of Geoph. Res. №115, 2010, P. 1-6, DOI: 10.1029/2010JD014287.
10. Cape Grim Greenhouse Gas Data. CSIRO. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.csiro.au/greenhouse-gases>.
11. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working group I. Contribution to the Fifth assessment Report of the IPCC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UpWknie5fs0>
12. Clouds and the Earth Radiant Energy System (CERES) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ceres.larc.nasa.gov/>
13. Data Product Documentation And Software Available On-Line. ISCCP. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://isccp.giss.nasa.gov/index.htm>
14. GISS Surface Temperature Analysis. National Aeronautics and Space Administration [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3.
15. Gusakova M.A., Karlin L.N. Transformation of longwave and shortwave radiation in the atmosphere // EMS Annual Meeting Abstracts, vol. 10, EMS2013-36, 2013. 13th EMS/ 11th ECAM, 09 – 13 September, Reading, UK, 2013.
16. Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), Climate Change 2007: The Physical Science Basis, report, Cambridge University Press, New York City, 996 p.
17. Oliver J.E., Hidore J.J. Climatology. An atmospheric science. Prentice Hall. New Jersey. 2002. – 410 p.
18. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Earth System Research Laboratory. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/cc_gg/trends.