

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Гусакова Мария Андреевна

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

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор

Карлин Лев Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор –

Покровский Олег Михайлович

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

кандидат физико-математических наук –

Бобылев Леонид Петрович

Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное учреждение Высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет» (ФГАУ ВПО «КФУ»)

Защита состоится «19» декабря 2013 г. на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «19» ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Кандидат физико-математических наук, доцент

Л.В. Кашлева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

В последние десятилетия самой обсуждаемой проблемой в гидрометеорологии являются климатические изменения. При этом высказываются диаметрально противоположные точки зрения на их причину и, соответственно, на их возможные тренды в будущем. Поэтому появление еще одного исследования в данном направлении вряд ли существенно продвинуло бы нас в понимании данной проблемы, если бы не одно важное обстоятельство. Стремительное развитие космических методов исследования в гидрометеорологии, наблюдавшееся в последнее время, привело к появлению совершенно новой информации, анализ которой дает возможность по новому взглянуть на существующие оценки роли различных климатообразующих факторов. В настоящем исследовании для этой цели использован большой массив космической информации. На его основе получены уточненные количественные оценки вкладов отдельных климатообразующих факторов в межгодовую изменчивость радиационных потоков в атмосфере и глобальной приповерхностной температуры воздуха. Это позволило сформулировать однопараметрическую модель эволюции межгодовых изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха и с ее помощью выделить новые тренды ее климатической изменчивости. Отмеченные обстоятельства делают работу весьма актуальной.

Цель и задачи исследования

Оценить влияние различных климатообразующих факторов на радиационные потоки в атмосфере и межгодовую изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха с использованием новейших данных наблюдений, включая спутниковые. На этой основе сформулировать однопараметрическую модель эволюции глобальной приповерхностной температуры Земли, основанную на энергетическом балансе Земли, позволяющую оценить будущие изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха с учетом влияния солнечной активности, парниковых газов с выделением вклада водяного пара, облачности и альбедо.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

— оценить современное состояние климатической системы Земли на основе спутниковых данных и наземных наблюдений;

— определить характер изменчивости радиационных потоков в атмосфере и оценить вклады атмосферных компонентов в межгодовые

изменения отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации и поглощенной атмосферой длинноволновой радиации с использованием спутниковой информации;

— установить связь между колебаниями глобальной приповерхностной температуры воздуха и наблюдаемыми изменениями климатообразующих факторов;

— оценить вклады парниковых газов с выделением вклада водяного пара, облачности в межгодовую изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха;

— оценить вклад изменчивости солнечной активности в изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха с учетом обратных связей;

— разработать однопараметрическую модель межгодовой изменчивости глобальной приповерхностной температуры воздуха, основанную на радиационном балансе Земли, учитывающую главные климатообразующие факторы;

— с помощью разработанной модели определить различные тренды будущих изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 г. при различных сценариях развития климатообразующих факторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Количественные оценки вкладов облачности, концентрации аэрозолей и отражательной способности поверхности Земли в межгодовую изменчивость отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации.

2. Количественные оценки вкладов облачности, концентрации парниковых газов с выделением водяного пара в межгодовую изменчивость поглощенной атмосферой длинноволновой радиации.

3. Количественные оценки вкладов облачности, концентрации парниковых газов с выделением водяного пара, приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации, обратных связей в межгодовую изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха.

4. Однопараметрическая модель изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха с параметризациями влияния водяного пара и других парниковых газов, облачности и обратных связей.

5. Сценарии изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 г., разработанные на основе предложенной модели.

Научная новизна работы:

1. Впервые получены количественные оценки вкладов облачности, концентрации аэрозолей и отражательной способности поверхности Земли в межгодовую изменчивость отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации с использованием спутниковой информации.

2. Впервые получены количественные оценки вкладов водяного пара и других парниковых газов и облачности в межгодовую изменчивость поглощенной атмосферой длинноволновой радиации с использованием спутниковой информации.

3. Впервые получены количественные оценки вкладов водяного пара и других парниковых газов, облачности и приходящей на верхнюю границу коротковолновой радиации в межгодовую изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха с использованием спутниковой информации.

4. Предложена новая однопараметрическая модель эволюции глобальной приповерхностной температуры воздуха, основанная на энергетическом балансе Земли, с использованием разработанной параметризации поглощения длинноволновой радиации парниковыми газами и облачностью.

Научное и практическое значение работы:

Работа имеет важное практическое значение для развития исследований закономерностей изменения климата Земли. Полученные оценки изменчивости радиационных потоков, глобальной приповерхностной температуры воздуха в зависимости от влияющих факторов (поток солнечной энергии, водяной пар и другие парниковые газы, облачность, аэрозоль, альбедо) могут быть использованы при уточнении моделей общей циркуляции атмосферы для прогнозирования изменчивости климата Земли.

Результаты исследования используются в Российском государственном гидрометеорологическом университете при подготовке специалистов-метеорологов, а также при проведении научных исследований. Работа выполнялась в рамках проекта Лаборатории Спутниковой Океанографии, которая была создана в РГГМУ в соответствии с решением Совета по грантам Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (протокол от 21 сентября 2011 г. №7) в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 220, а также в рамках Соглашения №14.В37.21.0619 между Минобрнауки

России и РГГМУ по поддержке научно-образовательных центров в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.»

Апробация работы:

Материалы, лежащие в основе работы, докладывались и обсуждались на заседании кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ, и также были представлены на нескольких российских и международных конференциях:

1. Summer school «Impact of climate change on resources, maritime transport and geopolitics in the Arctic and the Svalbard area» (Шпицберген, 2011);

2. European Geosciences Union General Assembly – 2012 (Вена, Австрия, 2012);

3. Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений (Иркутск, Россия, 2012).

4. European Geosciences Union General Assembly –2013 (Вена, Австрия, 2013);

5. 13th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applications of Meteorology (ЕСАМ) (Рединг, Великобритания, 2013).

Победитель гранта Правительства Санкт-Петербурга для студентов вузов Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга в 2012 г.

Победитель гранта Правительства Санкт-Петербурга для студентов вузов Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга в 2013 г.

Структура и объем диссертационной работы:

Диссертация состоит из списка используемых сокращений, введения, пяти глав, заключения и библиографического списка использованных источников. Текст диссертации включает 62 рисунка и 3 таблицы. Библиографический список содержит 101 наименование.

Личный вклад автора:

Автором самостоятельно осуществлена обработка и анализ спутниковой информации по радиационным потокам в атмосфере, количеству глобальной облачности и облачности на различных ярусах, а также содержанию водяного пара в атмосфере и концентрации аэрозолей. Также были обработаны и проанализированы натурные данные по глобальной температуре воздуха и концентрациям парниковых газов. На основе этих данных автор самостоятельно получила количественные оценки вкладов

климатообразующих факторов в отраженную в космическое пространство коротковолновую и поглощенную атмосферой длинноволновую радиации. Автором разработана методика количественной оценки вкладов водяного пара и других парниковых газов, облачности в изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха. Автором при участии научного руководителя сформулирована однопараметрическая модель изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха с параметризацией вкладов климатообразующих факторов. Автором самостоятельно произведены расчеты сценариев изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 года.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность, формируются цели и задачи исследования, излагается научная новизна, значимость. Определены основные защищаемые положения.

В **1 главе** дается описание современного состояния климатической системы, описывается история климата Земли и рассматриваются различные точки зрения на причины изменений климата Земли.

Рассматриваются **исторические сведения климатических изменений**. Климат Земли постоянно меняется, и периоды оледенения сменяются межледниковыми периодами. Во время последнего ледникового периода (около 20 000 лет до н.э.) температура воздуха была на 5 °С ниже современной. А около 6000 лет назад наблюдался голоценовый оптимум, при котором температуры в Европе были выше современных на 2 °С, сменившийся похолоданием (3000 лет назад). Затем, около 2000 лет назад наблюдался малый климатический оптимум, а после началось плавное похолодание, которое достигло минимума в XVII – XIX вв. (температура была на 1 °С ниже современной). Малый ледниковый период сменился повышением температуры во второй половине XIX века, которое прервалось незначительным понижением температуры в 40-х гг. XX века. В настоящий момент наблюдается плавное повышение глобальной температуры. Отдельно можно было бы рассмотреть, каким был бы климат Земли после Всемирного потопа. В том случае, если бы вся вода после Всемирного потопа испарилась в атмосферу, климат Земли был бы схож с современным климатом Венеры.

Рассматриваются **современные тенденции изменений климата**. Было выделено несколько параметров климатической системы, которые могут характеризовать изменения климата, и рассмотрены их колебания. Глобальная приповерхностная температура воздуха и уровень Мирового океана имели явный положительный тренд за последние десятилетия. Площадь морского арктического льда уменьшалась, в то время как площадь антарктического морского льда достигла рекордных максимальных значений в 2012 г. Значительно возросло и количество осадков за последние десятилетия, хотя также увеличилось и количество засух в некоторых регионах. Глобальная приповерхностная температура воздуха принята за индикатор изменений климата, так как она быстрее всего реагирует на различные внешние воздействия.

Дается описание **различных климатообразующих факторов и их воздействие на климатическую систему**. Климатическая система

испытывает колебания, которые имеют различный масштаб времени – от мелкомасштабных до изменений геологических эпох. В зависимости от временных масштабов климат подвержен воздействию различных климатообразующих факторов. Климатообразующие факторы можно разделить на несколько групп – естественные внешние и внутренние, а также антропогенные. Такие внешние факторы, как положение орбиты Земли в солнечной системе и орбитальные движения Земли, наклон оси Земли и скорость вращения Земли, масса и размер Земли, а также магнитное и гравитационные поля Земли влияют на долгопериодные изменения климата. Изменение количества поступающей на верхнюю границу солнечной радиации может влиять на кратковременные и долгопериодные климатические изменения. Внутренние климатообразующие факторы, такие как географическая широта, зональность, высота над уровнем моря, орография, океанические течения, растительный снежный и ледяные покровы формируют региональный климат, и также могут влиять на глобальные климатические изменения в мелкомасштабном временном интервале. Антропогенные факторы, такие как изменчивость парниковых газов в атмосфере, изменение аэрозольной составляющей в атмосфере и изменение характера подстилающей поверхности, приводит как к кратковременным изменениям, так и изменениям в масштабах десятилетий и более.

По первой главе можно сделать следующие выводы: климатическая система Земли подвержена временным изменениям в различных масштабах – от десятков до миллионов лет. Показано, что глобальную приповерхностную температуру воздуха можно использовать как индикатор изменчивости климата.

Во **2 главе** описываются используемые в работе наземные и космические данные гидрометеорологических характеристик, полученные за последние десятилетия, а также дается анализ изменчивости отдельных климатообразующих факторов.

Дается **характеристика данных**, используемых в исследовании. Для анализа и обработки данных использовались базы данных спутниковых и наземных наблюдений HadCRUT3, CSIRO, CERES, архивы международного спутникового проекта по облачности ISCCP, также для получения некоторых данных были использованы программа лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ (система NAIAD) и программа лаборатории Метеотехнологий РГГМУ. Архивы спутниковых наблюдений содержат данные с различных спутников, среди которых к наиболее известным можно отнести спутники AQUA/TERRA. Период рассматриваемых данных с 1984 по

2012 гг. Все данные были обработаны, а затем были рассчитаны отклонения от средних значений.

Проанализирована **изменчивость климатических характеристик** за последние десятилетия. Так как парниковые газы по-разному воздействуют на изменения климата, то используя формулы радиационного форсинга, концентрации парниковых газов за вычетом водяного пара приведены к единому эквиваленту. Суммарные концентрации парниковых газов имели тенденцию к увеличению за весь анализируемый период. Количество водяного пара в атмосфере имело слабо выраженный положительный тренд, а его ежегодные колебания хорошо согласуются с фазами Эль-Ниньо. Суммарное количество глобальной облачности имело отрицательный тренд за анализируемый период, при этом количество облачности, распределенное по ярусам, имело существенные отличия. Количество облачности нижнего яруса уменьшилось за анализируемый период, количество облачности верхнего и среднего ярусов за период 1983 – 1995 гг. оставалось в среднем постоянным, потом уменьшалось до 1997 г., а затем стало возрастать. В целом, количество облачности на верхнем и среднем ярусах имело положительный тренд за весь анализируемый период. Облачность вертикального развития не рассматривалось, так как обычно такая облачность имеет локальный характер и оказывает нейтральное воздействие на изменчивость глобального климата. Количество аэрозолей в атмосфере за период с 2001 по 2011 гг. имело слабую тенденцию к понижению. Глобальное альbedo за период 2001 – 2011 гг. имело слабый положительный тренд, в то время как альbedo поверхности Земли уменьшалось за этот же период, в связи с тем, что уменьшалась площадь морского льда.

Таким образом, из второй главы следует, что наличие спутниковой информации, накопленной за последние десятилетия, позволяет получить представление об изменчивости на этом масштабе времени основных климатообразующих факторов. Концентрации парниковых газов, включая водяной пар, количество облачности среднего и верхнего ярусов, глобальное альbedo имели тенденцию к увеличению за анализируемый период. Напротив, количество глобальной облачности, количество облачности нижнего яруса, аэрозолей и альbedo поверхности Земли имели отрицательный тренд.

В **3 главе** дается описание и анализ изменчивости радиационных потоков в атмосфере, а также произведены оценки вкладов различных компонентов в изменения отраженной в космическое пространство коротковолновой и поглощенной атмосферой длинноволновой радиации, как наиболее важных радиационных потоков, оказывающих влияние на изменчивость климата.

Дается подробное **описание радиационного баланса Земли** и проанализированы наиболее известные схемы радиационного баланса. Показаны существенные различия в значениях радиационных потоков у различных авторов. На основе проанализированных во второй главе данных радиационных потоков за период 2001 – 2011 гг. уточнена схема радиационного баланса Земли. Из года в год значения радиационных потоков не постоянны и зависят от многих факторов. За период 2001 – 2011 гг. количество приходящей коротковолновой радиации на верхнюю границу атмосферы уменьшилось, а количество приходящей коротковолновой радиации к поверхности Земли увеличилось, так как за этот же период уменьшалось количество глобальной облачности, которое способствует отражению коротковолновой радиации. Количество отраженной радиации от поверхности Земли прямо зависит от площади морского льда. В период 2001 – 2011 гг. площадь морского льда уменьшилась, что привело к уменьшению количества отраженной от поверхности Земли коротковолновой радиации. Поглощение длинноволновой радиации в атмосфере зависит от изменения содержания водяного пара и других парниковых газов, а также количества облачности. Так как концентрации водяного пара и других парниковых газов увеличивались за период 2001 – 2011 гг., то больше длинноволнового излучения осталось в атмосфере, тем самым уменьшилось количество уходящего излучения в космическое пространство. Сезонный ход коротковолновой и длинноволновой радиации у поверхности Земли имеют ярко выраженные минимум и максимум. Минимум коротковолновой радиации (приходящей и уходящей) приходится на летние месяцы, а минимум длинноволновой радиации наблюдается в холодное время года.

Рассматривается **влияние облачности, аэрозолей и отражательной способности поверхности Земли на межгодовую изменчивость отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации.** Найденные связи между значениями отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации и значениями глобальной облачности, количеством аэрозолей в атмосфере и отражающей способности поверхности Земли позволили сделать вывод о наличии зависимостей между этими параметрами, близких к линейным. Оценка значимости линейных зависимостей показала хорошие результаты. На основании полученных зависимостей была создана параметризация для расчета оценки вкладов каждой из этих характеристик в межгодовую изменчивость отраженной коротковолновой радиации (рис. 1). Из года в год относительные вклады атмосферных компонентов в межгодовые изменения отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации не постоянны. В 2001

году вклад облачности и аэрозолей суммарно достиг почти 30%, в то время как доминирующим фактором являлось отражение от поверхности Земли. За период 2002 – 2010 гг. основным фактором, влияющим на изменение отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации, являлась облачность. Ее вклад менялся от 44% в 2008 г. до 89% в 2007 г. Вклад аэрозолей был минимальным в 2009 г. и едва достиг 1%, максимум же пришелся на 2008 г. (около 52%). В среднем, за период 2001 – 2010 гг., на облачность пришлось около 73% отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации, в то время как вклад аэрозолей составил 14%, а вклад альbedo поверхности Земли был около 13%.



Рисунок 1 Вклад облачности, аэрозолей и альbedo поверхности Земли в изменения отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации.

Рассматривается **оценка вклада атмосферных компонентов в межгодовые изменения поглощения уходящей от Земли длинноволновой радиации.** Поглощение атмосферой уходящего от поверхности Земли длинноволнового излучения обуславливается наличием в атмосфере облачности, водяного пара и других парниковых газов. Найденные связи между значениями поглощенной атмосферой длинноволновой радиации и значениями глобальной облачности, концентрациями водяного пара и других парниковых газов позволили сделать вывод о наличии зависимостей между этими параметрами, близких к линейным. Оценка значимости линейных зависимостей показала хорошие результаты. На основании полученных зависимостей была создана параметризация для расчета количественной

оценки вкладов каждой из этих характеристик в межгодовую изменчивость поглощенного атмосферой длинноволнового излучения (рис. 2).

Относительный вклад атмосферных компонентов в межгодовые изменения поглощенной атмосферой длинноволновой радиации непостоянен и меняется из года в год. Так, например, вклад водяного пара был минимальным в 2007 году (около 11%), достигая максимальных значений в 2008 и 2010 гг. (85% и 82% соответственно). Вклад облачности менялся от незначительных значений - 2% (2001 г.) и 4% (2008 г.) до 54% в 2007 г. Вклад парниковых газов за вычетом водяного пара был минимальным в 2010 г. (8%), оказывая более сильное воздействие в 2001 и 2007 гг. (37% и 35% соответственно).

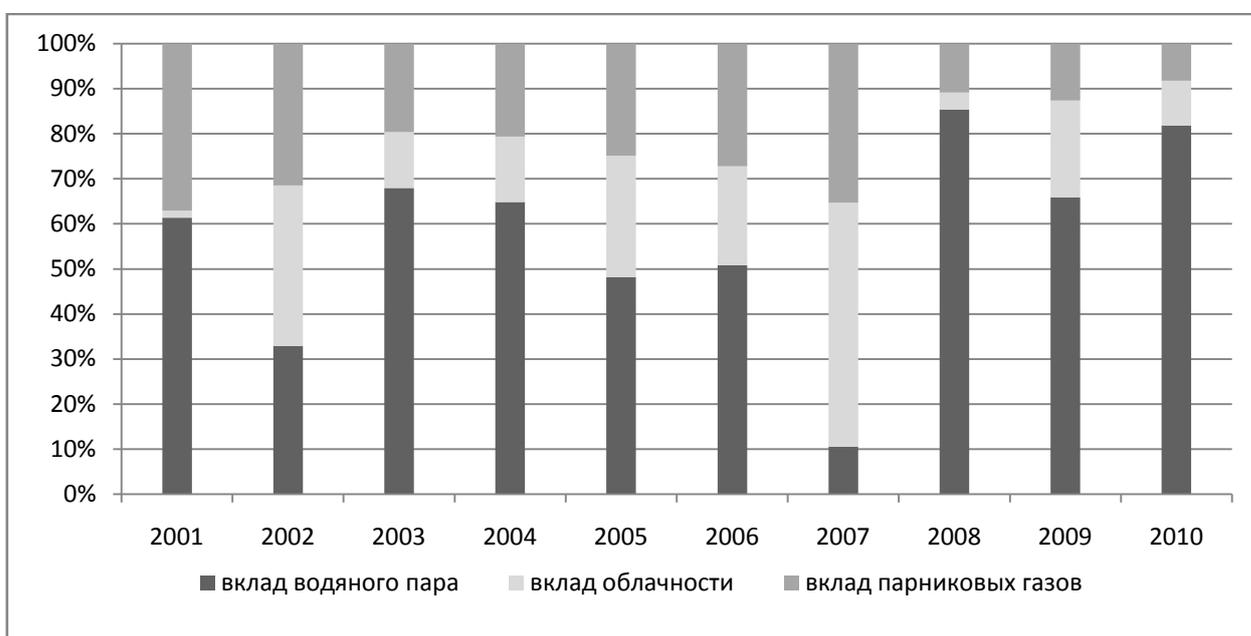


Рисунок 2 Вклады облачности, водяного пара и других парниковых газов в изменения поглощенной атмосферой длинноволновой радиации

В среднем, за период 2001 – 2010 гг. доминирующим фактором в изменениях количества поглощенной атмосферой длинноволновой радиации являлся водяной пар (около 64%), а на долю других парниковых газов и облачности приходилось около 19% и 17%.

Основой вывод из 3 главы: с использованием спутниковых данных уточнены значения составляющих радиационного баланса Земли. Относительный вклад влияющих факторов в изменчивость как отраженной в космическое пространство коротковолновой, так и поглощенной атмосферой длинноволновой радиации не постоянен и меняется из года в год. В среднем, за период 2001 – 2010 гг. доминирующим фактором в изменчивость отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации являлась

облачность, а поглощенной атмосферой длинноволновой радиации – водяной пар.

В главе 4 рассматривается оценка вкладов влияющих факторов на изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха.

Сформулирована однопараметрическая модель изменчивости глобальной приповерхностной температуры воздуха. В модели использована параметризация уходящего в космическое пространство длинноволнового излучения, разработанная М.И. Будыко. С помощью разработанной однопараметрической модели, основанной на радиационном балансе Земли, произведена оценка радиационных факторов в изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха. За период 2001 – 2011 гг. были выбрано среднее, минимальное и максимальное значения изменчивости приходящей на верхнюю границу атмосферы радиации и для этих значений были рассчитаны возможные изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха. Рассматривалось 2 случая. В первом случае, глобальное альbedo оставалось постоянной величиной, т.е. обратная связь глобальное альbedo - глобальная приповерхностная температура воздуха отсутствовала (рис. 3).

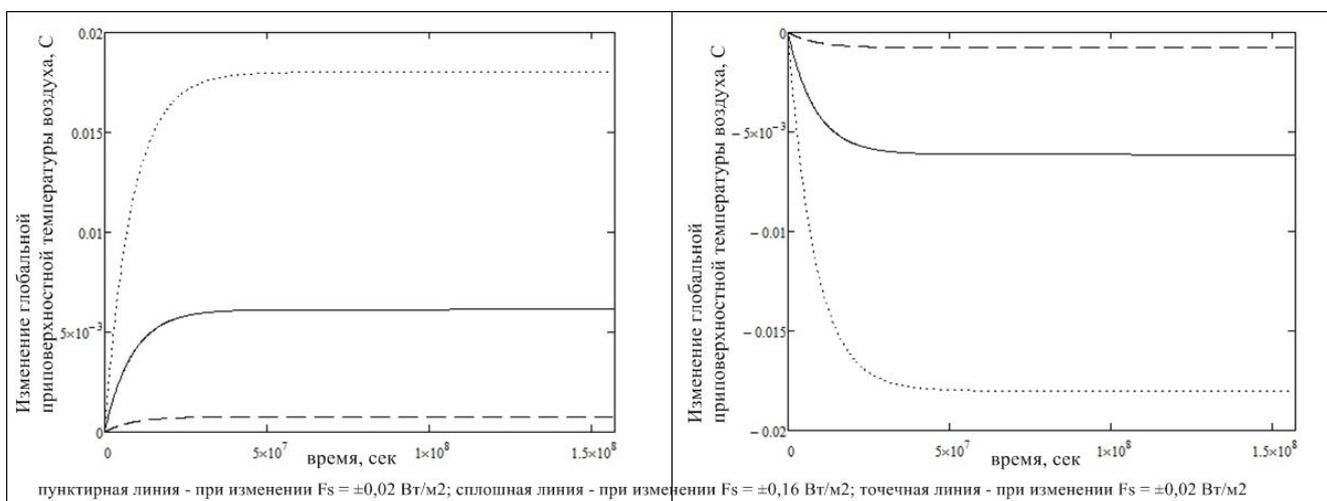
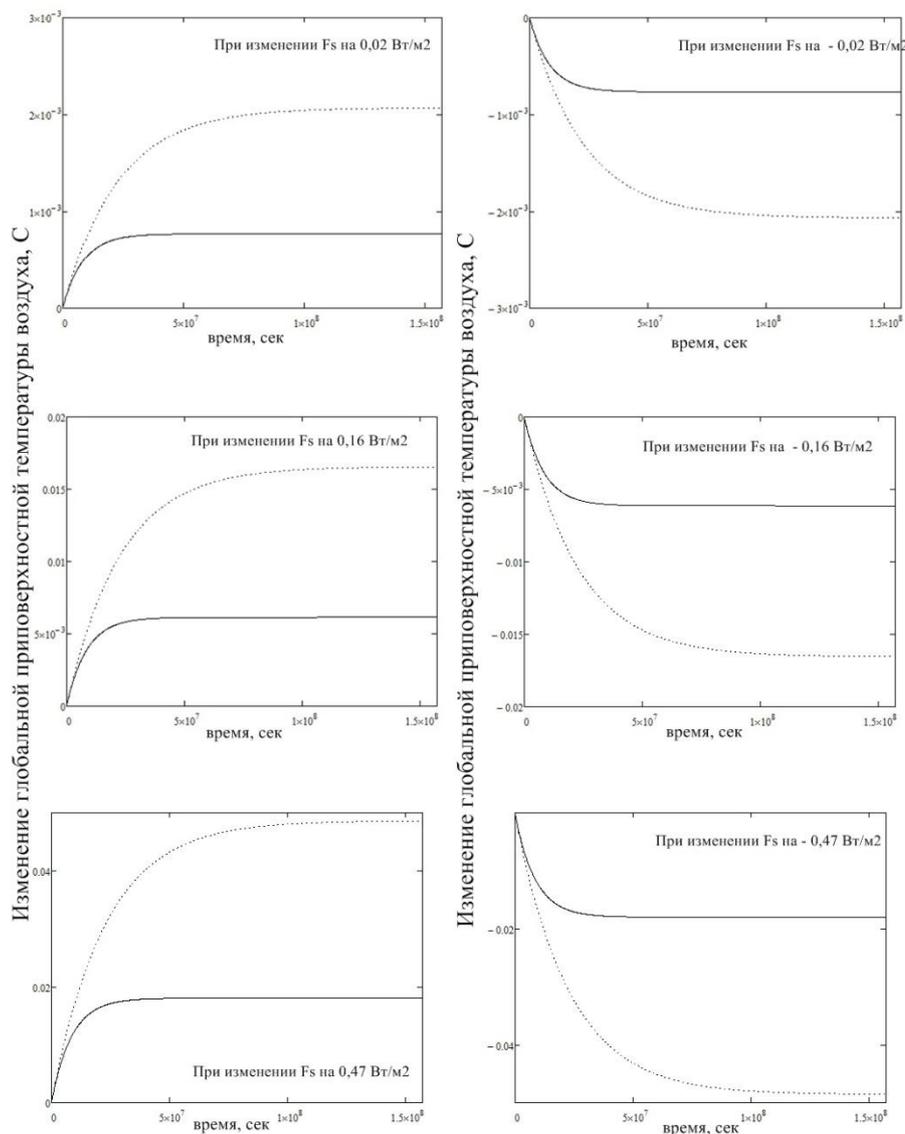


Рисунок 3 Изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха при изменении приходящей солнечной радиации при отсутствии обратных связей.

Показано, что глобальная приповерхностная температура воздуха повышается/понижается в зависимости от изменения приходящего солнечного потока - ΔF_s . Причем, чем больше приращение коротковолновой радиации, тем сильнее изменяется глобальная температура. При изменении солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы, на значение $\Delta F_s = \pm 0,02 \text{ Вт/м}^2$ глобальная приповерхностная температура воздуха изменилась на $\Delta T = \pm 0,08 \times 10^{-2} \text{ С}$, при изменении $\Delta F_s = \pm 0,16 \text{ Вт/м}^2$ – температура

изменилась на $\Delta T = \pm 0,61 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$, а при изменении $\Delta F_s = \pm 0,47 \text{ Вт/м}^2$ - температура изменилась на $\Delta T = \pm 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$. Время достижения равновесного состояния глобальной приповерхностной температуры воздуха менялось мало (в среднем – 2,3 года).

Во втором случае, была разработана параметризация, описывающая зависимость глобального альбеда от глобальной приповерхностной температуры воздуха. Разработанная параметризация была включена в однопараметрическую модель. С помощью уточненной однопараметрической модели были рассчитаны изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха при тех же изменениях солнечного потока, что и в расчетах без учета обратной связи (рис. 4).



сплошная линия - без обратных связей; точечная линия - при работе обратных связей

Рисунок 4 Изменение глобальной приповерхностной температуры воздуха при изменении приходящей солнечной радиации без обратных связей и при наличии (зависимость глобального альбеда от глобальной приповерхностной температуры воздуха).

При изменении солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы, на $\Delta F_s = \pm 0,02 \text{ Вт/м}^2$ глобальная приповерхностная температура воздуха изменилась на $\Delta T = \pm 0,21 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ примерно через 4,4 года, при изменении на $\Delta F_s = \pm 0,16 \text{ Вт/м}^2$ – температура изменилась на $\Delta T = \pm 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ примерно через 5 лет, а при изменении на $\Delta F_s = \pm 0,47 \text{ Вт/м}^2$ - температура изменилась на $\Delta T = \pm 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ примерно через 6,1 года.

При изменении солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы, на $\Delta F_s = \pm 0,02 \text{ Вт/м}^2$ глобальная приповерхностная температура воздуха изменилась на $\Delta T = \pm 0,21 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ примерно через 4,4 года, при изменении $\Delta F_s = \pm 0,16 \text{ Вт/м}^2$ – температура изменилась на $\Delta T = \pm 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ примерно через 5 лет, а при изменении $\Delta F_s = \pm 0,47 \text{ Вт/м}^2$ - температура изменилась на $\Delta T = \pm 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ примерно через 6,1 года. Очевидно, что при наличии обратных связей (глобальное альбедо – глобальная приповерхностная температура воздуха), увеличивается амплитуда изменчивости глобальной приповерхностной температуры воздуха более чем в 2,6 раза. Наличие обратных связей также приводит к увеличению времени, которое требуется температуре, чтобы достичь установившегося состояния.

Рассматривается **оценка вклада облачности, водяного пара и других парниковых газов в межгодовую изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха.** Найденные связи между значениями глобальной приповерхностной температуры воздуха и значениями глобальной облачности, концентрациями водяного пара и других парниковых газов позволили сделать вывод о наличии зависимостей между этими параметрами, близких к линейным. Оценка значимости линейных зависимостей показала адекватность построенных статистических моделей. На основании полученных зависимостей была создана параметризация для расчета количественной оценки вкладов каждой из этих характеристик в межгодовые изменения глобальной температуры воздуха. Показано, что доминирующий фактор изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха отсутствует (рис. 5.)

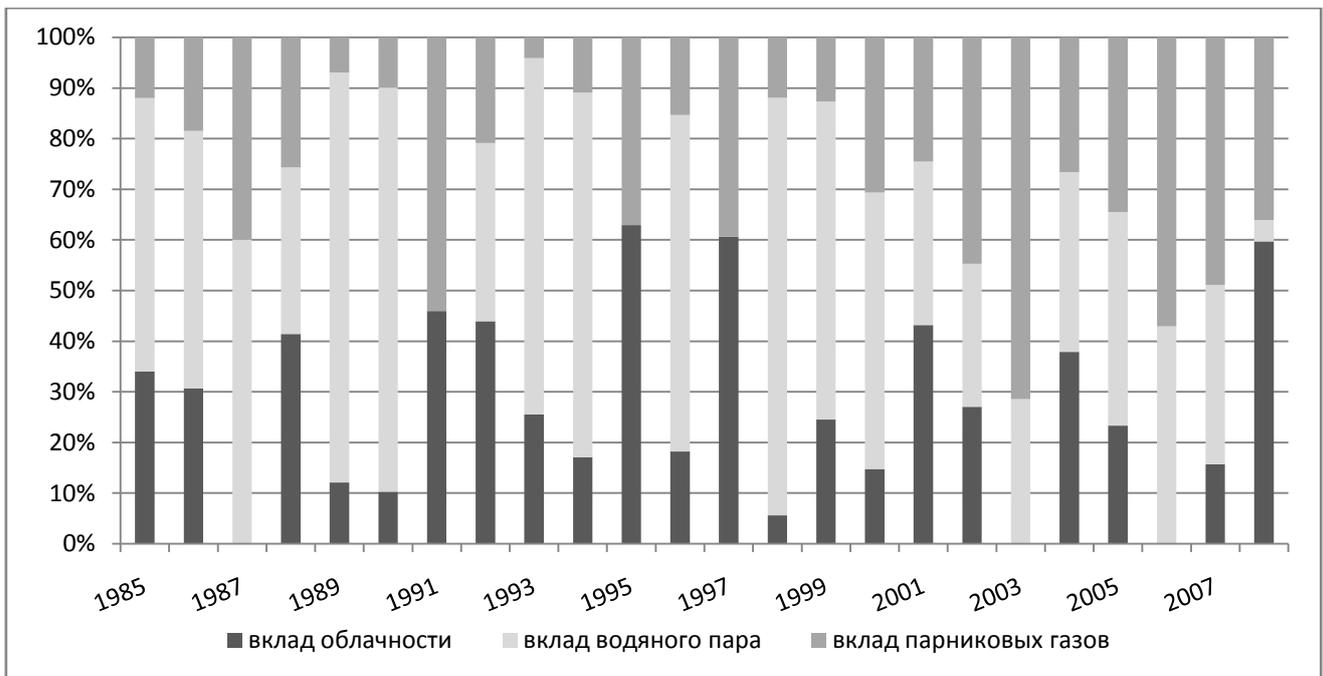


Рисунок 5 Вклад климатообразующих факторов в изменение глобальной приповерхностной температуры воздуха

Содержание парниковых газов за вычетом водяного пара в атмосфере монотонно увеличивается, а их относительный вклад в изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха хоть и всегда положительный, но меняется из года в год. Наибольшие относительные вклады этих парниковых газов наблюдались в 1991 г. (54%), 2003 г. (71%) и в 2006 г. (58%). Наименьшие значения относительного вклада отмечались в 1989 г. (9%), 1993 г. (6%), в 1994, 1998 и 1999 г. по 11%. Иначе ведет себя содержание водяного пара и облачности в атмосфере, изменения которых год от года имеют разные знаки. В 1995, 1997, 2008 гг. количество глобальной облачности значительно уменьшилось, что привело к усилению ее относительного вклада в изменения глобальной температуры – около 60 %. При менее значимых изменениях количества облачности ее вклад был существенно меньше, около 10%, в 1989, 1990 гг., около 6 % в 1998 г., а в 1987, 2003, 2006 гг. – менее 1%. Роль водяного пара также менялась из года в год. В 1987, 1989, 1990, 1993, 1994, 1996, 1998, 2006 гг. его вклад в изменения температуры был доминирующим от 60% (1987 г.) до 86% (1998 г.). Напротив, в 1988 и 2002 гг. вклад водяного пара не превышал 30%, а в 2008 г. – 6%, а в 1991, 1995, 1997 гг. – не более 1%. Одной из причин различной интенсивности влияния изменений количества облачности и концентрации водяного пара на глобальную температуру воздуха можно считать явление Эль-Ниньо. В годы, когда наблюдалось Эль-Ниньо, резко возрастал вклад этих факторов в изменение температуры, доходя до 89%. При этом, относительный вклад других парниковых газов резко уменьшался, например, в 1998 г. – едва достигнув 11%. За период 1984 –

2008 гг. осредненный вклад облачности и парниковых газов за вычетом водяного пара в изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха 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 IPCC, где считается, что главным фактором, влияющим на изменение глобальной приповерхностной температуры воздуха, являются парниковые газы (углекислый газ, метан и закись азота)

Из главы 4 следует, что изменение солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы, приводит к значительным изменениям глобальной приповерхностной температуры воздуха. При этом наличие обратных связей (глобальное альbedo – глобальная приповерхностная температура воздуха), увеличивает амплитуду изменчивости глобальной приповерхностной температуры воздуха более чем в 2,6 раза. Доминирующий фактор межгодовых изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха отсутствует. В среднем, за период с 1984 по 2008 гг. доминирующим фактором в изменения глобальной температуры воздуха являлся водяной пар (64%), на облачность и другие парниковые газы приходилось 24 и 20% соответственно.

В главе 5 представлены обзор климатических моделей и описание разработанной однопараметрической модели эволюции глобальной приповерхностной температуры воздуха, а также на основе предложенной модели рассчитаны сценарные оценки тенденций будущих изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха.

Дана **классификация современных климатических моделей**. По сложности модели разделены на 4 типа – от простых до сложных трехмерных моделей совместной циркуляции атмосферы и океана. Простые модели могут быть использованы для оценки трендов изменчивости различных климатических характеристик, модели промежуточной сложности предназначены для исследования климата в континентальных масштабах. Сложные трехмерные модели могут описывать океанические, атмосферные и наземные процессы, а также различные компоненты климатической системы. Все классы моделей имеют свои преимущества и недостатки. Простые климатические модели не могут описать или спрогнозировать детальные изменения климатических параметров, но на их основе можно оценить будущие тенденции изменчивости климата. Обычно такие модели носят вспомогательный характер в исследованиях изменений климата.

Дается описание **разработанной однопараметрической модели изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха**. Модель

основана на энергетическом балансе Земли, при этом считается, что Земля излучает длинноволновую радиацию согласно закону Стефана-Больцмана. В модели используется параметризация альбедо, рассмотренная в главе 3, а также параметризовано поглощение в атмосфере длинноволновой радиации облачностью, водяным паром и другими парниковыми газами. Эмпирические коэффициенты для разработанных параметризаций были найдены с использованием данных, описанных в главе 2.

Для проверки модели был произведен сравнительный анализ рассчитанных по модели значений глобальной приповерхностной температуры воздуха с фактическими данными по температуре за период 2001 – 2011 гг., и уточнены эмпирические коэффициенты.

Можно констатировать, что разработанная модель достаточно хорошо воспроизводит наблюдаемые изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха (рис. 6). При этом модель позволяет дать интерпретацию некоему парадоксу в эволюции глобальной приповерхностной температуры воздуха, не разрешимому 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. В то же время в эволюции глобальной приповерхностной температуры воздуха имеют место периоды, когда ее значения уменьшались (2004, 2006, 2008, 2011 гг.). На разработанной модели, учитывающей изменения приходящей коротковолновой радиации на верхней границе атмосферы, удается, 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 приповерхностной температуры воздуха 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 2 сценария изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 года. В основу обоих сценариев положен прогноз изменения солнечной активности, в котором предполагается, что количество приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации с начала XXI века постепенно начинает понижаться. В основе первого сценария лежит предположение о постепенном увеличении парниковых газов (за исключением водяного пара), которое наблюдалось за последние десятилетия (на $1,93 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$). В соответствии со вторым

сценарием концентрация парниковых газов, за исключением водяного пара, остается постоянной до 2030 года на уровне 2011 г.

Наши расчеты показывают, что при постоянном увеличении концентрации парниковых газов на заданное значение, приповерхностная температура воздуха будет плавно увеличиваться до 2030 г. В этом случае, в 2030 году температура воздуха может достигнуть значения 288,39 К (15,39 °С), причем разница в температуре по сравнению с 2012 г. составит 0,64 градуса. При фиксированном на уровне 2011 года значении концентрации парниковых газов, приземная температура будет колебаться вокруг современных значений, причем в 2030 году она составит 287,75 К (14,75 °С), что соответствует температуре 2012 г.

Выбранные условия позволили сравнить наши результаты с прогнозами изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха, представленными IPCC в 2013 г. [Climate Change 2013: The Physical Science Basis]. Все последние сценарии IPCC предполагают повышение глобальной приповерхностной температуры воздуха к 2030 году. При этом модели IPCC дают различные оценки повышения температуры. Считается, что минимальное значение повышения температуры по сравнению с 2012 г. составит в 2030 году 0,43 градуса, а максимальное –1,53 градуса. В среднем, глобальная приповерхностная температура воздуха по прогнозам IPCC может повыситься на 0,98 градуса (рис. 6).

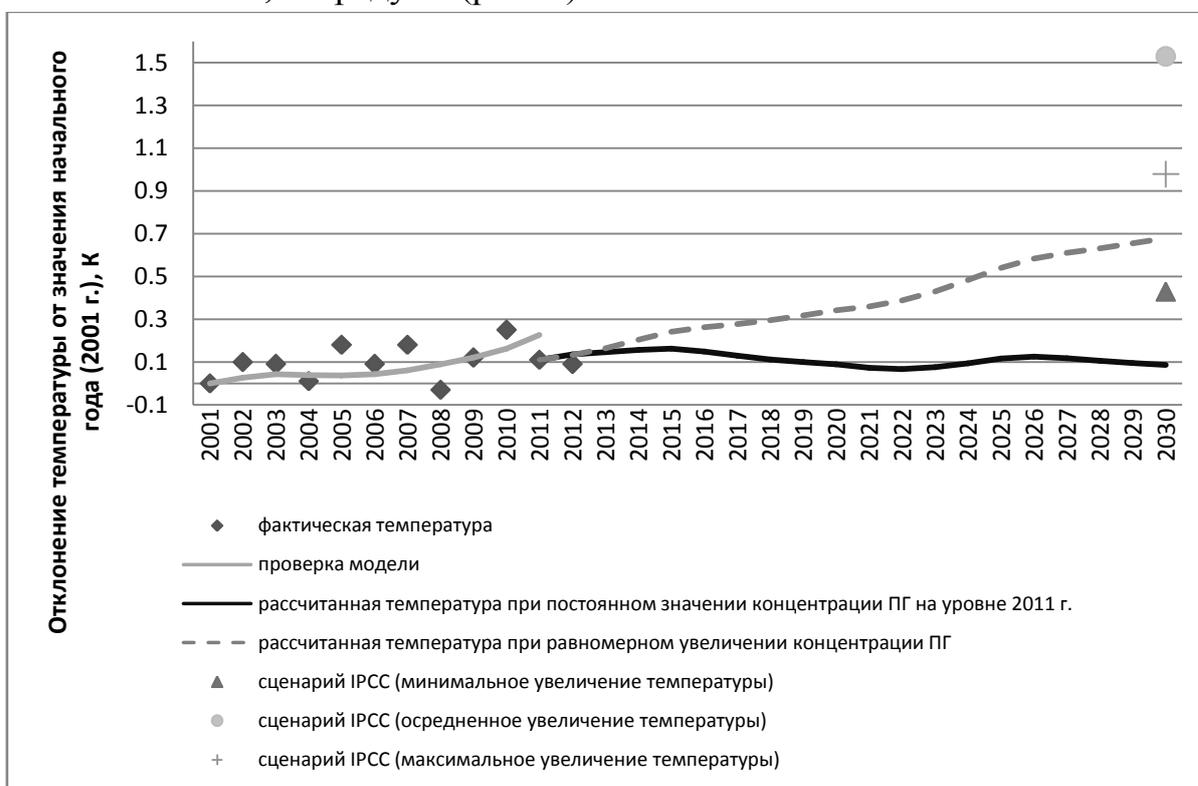


Рисунок 6 Сценарии изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 г.

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 градуса по сравнению с прогнозируемым IPCC значением максимального повышения температуры и на 0,3 градуса ниже осредненного повышения температуры. При постоянном значении концентрации парниковых газов, зафиксированных на уровне 2011 года, рассчитанное нами значение глобальной приповерхностной температуры к 2030 году должно быть ниже на 0,34 градуса по сравнению с аналогичными значениями, приведенными IPCC. 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 IPCC признают данный параметр незначительным.

Основными результатами, описанными в 5 главе, являются: создание однопараметрической модели эволюции глобальной приповерхностной температуры воздуха с параметризациями обратных связей (зависимость глобального альбедо от глобальной приповерхностной температуры воздуха) и поглощения в атмосфере длинноволновой радиации водяным паром и другими парниковыми газами, а также облачностью. Показано, что к 2030 г. при сохранении скорости увеличения концентрации парниковых газов (за вычетом водяного пара), которое наблюдалось в последние десятилетия, глобальная приповерхностная температура воздуха увеличится на 0,64 градуса по сравнению с 2012 г. При сохранении концентрации парниковых газов (исключая водяной пар) на уровне 2011 г., глобальная приповерхностная температура воздуха будет колебаться в пределах современных значений и к 2030 году останется равной температуре 2012 г. В целом рассчитанные значения глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 года при прочих равных условиях оказываются существенно ниже прогнозных оценок IPCC.

Основные результаты исследования

1. Получены количественные оценки вкладов облачности, концентрации аэрозолей и отражательной способности поверхности Земли в межгодовую изменчивость отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации. Относительный вклад различных факторов в изменчивость

отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации не постоянен и меняется из года в год. В среднем, за период 2001 – 2010 гг. доминирующим фактором в изменчивость отраженной в космическое пространство коротковолновой радиации являлась облачность (около 73 %), на вклад аэрозолей и отражательной способности поверхности Земли пришлось 14 % и 13% соответственно.

2. Получены количественные оценки вкладов облачности, водяного пара и других парниковых газов в межгодовую изменчивость поглощенной атмосферой длинноволновой радиации. Относительный вклад различных факторов в изменчивость поглощенной атмосферой длинноволновой радиации не постоянен и меняется из года в год. В среднем, за период 2001 – 2010 гг. доминирующим фактором в изменчивость поглощенной атмосферой длинноволновой радиации являлся водяной пар (около 64%), на вклад других парниковых газов и облачности пришлось 19 % и 17 % соответственно.

3. Получены количественные оценки вкладов облачности, концентрации водяного пара и других парниковых газов, приходящей солнечной радиации, обратных связей в межгодовую изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха. Произведена оценка вклада обратных связей (зависимость глобального альбедо от глобальной приповерхностной температуры воздуха). Количественный вклад обратных связей увеличивается с увеличением потока приходящей солнечной радиации, при этом температура вследствие влияния обратных связей повышается/понижается в среднем в 2,6 раза. Наличие обратных связей также приводит к увеличению времени (от 2 до 4 лет), которое требуется температуре, чтобы достичь установившегося состояния. Доминирующий фактор межгодовых изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха отсутствует. В среднем, за период с 1984 по 2008 гг. доминирующим фактором в изменения глобальной температуры воздуха являлся водяной пар (64%), на другие парниковые газы и облачность приходилось 20% и 24% соответственно.

4. Разработана однопараметрическая модель изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха с параметризациями влияния водяного пара и других парниковых газов, облачности и обратных связей и учитывающая изменчивость приходящей солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы.

5. На основе разработанной модели предложены сценарии изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха. При сохранении скорости увеличения концентрации парниковых газов (за вычетом водяного пара), которое наблюдалось в последние десятилетия, глобальная приповерхностная температура воздуха будет плавно увеличиваться к 2030

году. В 2030 году температура воздуха может достигнуть значения 288,39 К (15,39 °С), причем разница в температуре по сравнению с 2012 г. составит 0,64 градуса. При фиксированном на уровне 2011 года значении концентрации парниковых газов, приземная температура будет колебаться вокруг современных значений, причем в 2030 году она составит 287,75 К, что соответствует температуре 2012 г. В целом рассчитанные значения глобальной приповерхностной температуры воздуха до 2030 года при прочих равных условиях оказываются существенно ниже прогнозных оценок ИРСС.

Публикации автора в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. **М.А. Гусакова**, Л.Н. Карлин. Оценка вклада парниковых газов, водяного пара и облачности в изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха // Метеорология и гидрология. – 2014. - №2.

2. **М.А. Гусакова**, Л.Н. Карлин. Оценка влияния отдельных климатообразующих факторов на радиационные потоки в атмосфере и межгодовую изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха // Ученые записки РГГМУ – 2013. - №31.

3. **М.А. Гусакова**. Влияние облачности на кратковременные климатические изменения // Ученые записки РГГМУ – 2013, №29 – 95 – 99 с.

4. Климат Земли: Мифы и реальность. А.А.Алимов, Л.Н. Карлин, А.А. Музалевский, И.Н. Самусевич, **М.А. Гусакова**. Приложение к журналу Безопасность Жизнедеятельности. М. 2011. №2 – 24 с.

Другие публикации по теме диссертации

1. **М.А. Gusakova**, L.N. Karlin. Transformation of longwave and shortwave radiation in the atmosphere // EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 10, EMS2013-36, 2013. 13th EMS/ 11th ECOM, 09 – 13 September, Reading, UK, 2013.

2. **М.А. Gusakova**, L.N. Karlin. Assessment of contribution of greenhouse gases, water vapour and cloudiness to global surface air temperature changes // EGU General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-936, 2013, 07 – 12 April, Vienna, Austria, 2013.

3. **М.А. Гусакова**, Л.Н. Карлин. Моделирование глобальной приповерхностной температуры воздуха // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений», 18 – 22 июня, г. Иркутск, Россия, 2012.

4. **М.А. Gusakova**. Global air temperature modeling // The Book of abstracts of The Royal Meteorological Society Student Conference 2012, 9 – 13 July, Leeds, UK, 2012.

5. **M.A. Gusakova**, L.N. Karlin. Modeling of global surface air temperature // EGU General Assembly 2012, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-11175, 2012, 22 – 28 April, Vienna, Austria, 2012.

6. **М.А. Гусакова**. Аналитическая модель изменений климата// Тезисы докладов к Международной конференции «Инновационные методы решения современных проблем фундаментальной физики атмосферы и ее приложений», Санкт-Петербург, Россия, 2011.