

РАЗДЕЛ 2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Глава 2.1. ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИЧИНАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

В. М. Катцов

П. В. Спорышев, И. Л. Кароль

2.1.1. Введение

Как отмечается в ОД_РФ-1, климатическая система Земли, под которой обычно понимают пять взаимодействующих друг с другом компонентов: атмосферу, гидросферу, криосферу, деятельный слой суши и биосферу, никогда не находится в состоянии равновесия. Она непрерывно меняется, даже в отсутствие изменений во внешних воздействиях. Под последними понимаются естественные и антропогенные факторы, влияющие на климатическую систему извне и вызывающие изменения климата*. При этом, к *естественным* внешним воздействиям относятся колебания орбитальных параметров Земли, вулканическая деятельность, солнечная активность, к *антропогенным* – изменения га-

зового и аэрозольного составов атмосферы в результате хозяйственной деятельности человека, изменения характера землепользования. *Собственная*, т. е. не связанная с внешними воздействиями, изменчивость климатической системы обусловлена нелинейными взаимодействиями между перечисленными ее компонентами, имеющими разные времена отклика на внешние воздействия. Обратные связи разных знаков и нелинейность внутренних взаимодействий, присущих климатической системе Земли, чрезвычайно усложняют ее реакцию на внешние воздействия и, соответственно, выявление изменений климата и установление их причин, не говоря уже о прогнозе изменений климата.

Главной задачей фундаментальных исследований климатической системы Земли является *прогноз ее эволюции*. Прогнозирование венчает собой цикл исследований: от наблюдения за климатической системой и формули-

* Определение понятия “климат” обусловлено поставленной задачей. По этой причине определений климата много и они эволюционируют. Например, определение климата А. С. Мониним (1982) как “статистический ансамбль состояний, которые проходит система океан-суша-атмосфера за периоды времени в несколько десятилетий” может быть дополнено теперь двумя другими компонентами климатической системы – криосферой и биосферой. При этом в математической теории климата бывает удобно рассмотрение указанного ансамбля на промежутке времени, стремящемся к бесконечности. При такой постановке климат не испытывает изменений. Для большого количества задач, решаемых Росгидрометом подходит определение Г. В. Грузы и Э. Я. Раньковой (2003): “Климат в узком, но широко распространенном смысле, есть обобщение изменений погоды, и представляется набором условий погоды в заданной области пространства в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание в терминах средних, экстремумов, показателей изменчивости соответствующих величин и повторяемостей явлений за выбранный период времени. Все эти дескриптивные статистики называются климатическими переменными.” Это определение использовано и в ОД_РФ-1.

2.1. ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИЧИНАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

ровки гипотез* относительно действующих в ней механизмов, воплощении этих гипотез в модели и проверка моделей путем сравнения модельных результатов с данными наблюдений. Когда качество модели признано удовлетворительным, можно говорить о создании теории**, а модель – использовать в прогнозах.

Парниковый эффект как регулятор температуры на нашей планете известен еще с XIX века, но активно его обсуждать стали в 1960-е годы. CO₂, метан, закись азота, некоторые другие газы, а также водяной пар подобно теплице укрывают Землю, пропуская проходящие от солнца короткие волны и задерживая длинные, излучаемые нагретой Землей в космос. Парниковый эффект – один из факторов, обеспечивающих пригодность нашей планеты для жизни.

Однако с тех пор, как человек стал сжигать во все возрастающих количествах ископаемое топливо с выбросом в атмосферу парниковых газов, прежде всего CO₂, парниковый эффект стал быстро усиливаться. Нижняя часть атмосферы стала интенсивно теплеть, разбудив в климатической системе процессы, ускоряющие потепление. Возникла новая глобальная угроза, противодействие которой, очевидно, потребует скоординированных и очень значительных усилий всего человечества.

Современное пристальное внимание к проблеме антропогенного изменения климата и активные дискуссии по этой теме могут создать ложное впечатление о ее “молодости”. Между тем, теория антропогенного изменения глобального климата имеет, по-видимому, почти двухвековую историю, если вести отсчет от первых гипотез относительно роли парникового эффекта в формировании климатических условий нашей планеты***. Предположение о потенциальной важности собственно антропогенного фактора для климата Земли было высказано более столетия назад. С тех

пор эта теория, пережив длительный период слабого к ней интереса, достигла степени развития, когда стали возможны не только оценки будущих изменений климатической системы, но и проверка прогнозов, сделанных некоторое время тому назад.

Настоящая глава открывает раздел, посвященный оценке новейших результатов в области исследования причин наблюдаемых изменений климата, имея своей целью ретроспективное рассмотрение эволюции теории антропогенного изменения климата, получающей все новые подтверждения в современных исследованиях.

2.1.2. Антропогенное изменение глобального климата: от гипотезы к теории

Истоки гипотезы антропогенного изменения климата следует искать в XIX в., когда никакого практического значения эта проблема не имела. Содержание CO₂ в атмосфере, как было оценено позднее по ледовым кернам, в это время не превышало 290 млн⁻¹, а средняя глобальная температура к середине века составляла около 13.6°C.

Идея о механизме парникового эффекта была впервые изложена в 1827 г. Жозефом Фурье в статье “Записка о температурах земного шара и других планет” (Fourier, 1827). В этой работе были рассмотрены различные механизмы формирования климата Земли, включая как факторы, влияющие на общий тепловой баланс Земли, так и факторы, влияющие на теплоперенос и температуры климатических поясов. В числе первых был рассмотрен фактор, получивший впоследствии название парникового эффекта. Фурье пришел к заключению, что Земля была бы значительно холоднее в отсутствие атмосферы.

В 1859 г. Джон Тиндалл обнаружил, что некоторые газы задерживают инфракрасное излучение и предположил, что изменение концентраций

* Гипотеза, то, что лежит в основе, – причина или сущность. В современном словоупотреблении гипотеза – выраженное в форме суждения (или суждений) предположение или предугадывание чего-либо: например, “предугадывание природы” в формулировке естественнонаучных законов. При этом первоначальный смысл термина “гипотеза” вошел в содержание понятия “научная гипотеза”, выражающего предположительное суждение о закономерной (или причинной) связи явлений (БСЭ, 1971).

** Теория, в широком смысле – комплекс взглядов, представлений, идей, направленных на истолкование и объяснение какого-либо явления; в более узком и специальном смысле – высшая, самая развитая форма организации научного знания, дающая целостное представление о закономерностях и существующих связях определенной области действительности – объекта данной теории (БСЭ, 1976).

*** Подробный обзор этой истории можно найти, например, в книге Спенсера Уирта (Weart, 2008), а вклад отечественной науки в исследования климатических изменений, предшествующие созданию МГЭИК достаточно детально представлен в монографии под редакцией М. И. Будыко и Ю. А. Израэля (Борзенкова и др., 1987). Материалы, представленные в этих работах, фактически послужили основой настоящей главы.

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

этих газов может приводить к изменению климата. Наиболее эффективным из рассмотренных Тиндаллом газов оказался водяной пар (H_2O); другим – диоксид углерода (CO_2), несмотря на его малые концентрации в атмосфере (Tyndall, 1861).

В 1896 г. Сванте Аррениус опубликовал первый расчет глобального потепления в результате выбросов CO_2 (Arrhenius, 1896), в том числе – результаты оценки увеличения концентрации диоксида углерода в атмосфере в 1.5, 2, 2.5 и 3 раза. В частности, при удвоении CO_2 он получил увеличение глобальной температуры на 5–6°C (эти оценки были впоследствии им уточнены в сторону уменьшения). Впрочем, для такого увеличения концентрации CO_2 в атмосфере, по его мнению, потребовались бы тысячелетия (при сохранении темпов промышленного развития конца XIX в.). Результаты Аррениуса подверглись критике со стороны некоторых ученых. Как бы то ни было,

антропогенное потепление ни для Аррениуса, ни для кого-либо из его современников не выглядело угрожающе. Аррениус также выдвинул гипотезу, что снижение концентрации CO_2 в атмосфере может являться одной из причин возникновения ледниковых периодов. Полученная Аррениусом оценка воздействия удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере на среднюю глобальную температуру стала первой в исторической последовательности подобных оценок, выполненных в последующие годы (см. таблицу 2.1.1).

В 1897 г. Томас Чемберлен предложил свою модель глобального обмена углеродом, включающую обратные связи, в том числе и водяного пара, и объясняющую климатические изменения на геологических временных масштабах колебаниями концентрации CO_2 в атмосфере (Chamberlin, 1897). Гипотезы Аррениуса и Чемберлена подверглись критике со стороны Кнута Ангстрема и его

Таблица 2.1.1. Оценки воздействия удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере на среднюю глобальную температуру, по данным различных исследователей (Борзенкова и др., 1987; Edwards, 2010)

Исследователи	Год	Чувствительность климата к удвоению CO_2	Примечание
Аррениус	1896	5–6°C	2-мерная зонально-вертикальная модель; ручной расчет
Херлберт	1931	4°C	Оценка (Hulburt, 1931) замечена только в 1960-х гг. из-за неприятия в целом теории CO_2 ; Каллендер не знал о работе Херлберта до 1942 г.
Каллендер	1938	1.5°C	1-мерная модель переноса радиации; удвоение CO_2 не упоминается в тексте, но присутствует на рисунке; конвекция не учитывается
Каллендер	1949	2.1°C	Пересмотренные результаты расчетов 1938 г.; удвоение CO_2 упоминается явно
Пласс	1956	3.8°C	1-мерная модель переноса радиации; не учитывается конвекция и обратная связь водяного пара
Меллер	1963	1.5–9.6°C	1-мерная модель баланса энергии у поверхности; совместное поглощение H_2O и CO_2 уменьшает общее потепление, но обратная связь водяного пара производит “почти произвольные изменения температуры”
Пласс, Килинг и др.	1963	3.8°C	Консенсусная оценка
Манабе и Везеролд	1967	2.4°C	1-мерная радиационно-конвективная модель; влажность и облачность оказывают сильное воздействие на эффект удвоения CO_2
Манабе	1970	1.9°C	Пересмотренная версия 1-мерной радиационно-конвективной модели Манабе и Везеролда 1967 г.; чувствительность оценена для “осредненной” облачности
Расул и Шнайдер	1971	0.8°C	1-мерная радиационно-балансовая модель с фиксированными относительной влажностью и облачностью
Будыко	1974	2.5–3.5°C	Упрощенная климатическая модель
Манабе и Везеролд	1975	2.9°C	Первое использование глобальной модели общей циркуляции для расчета эффектов удвоения CO_2
Будыко	1977	3.3°C	Анализ данных инструментальных наблюдений
Будыко	1979	3.5°C	Анализ палеоклиматических данных

2.1. ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИЧИНАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

сторонников, считавших роль углекислого газа как причины потепления пренебрежимо малой, по сравнению с водяным паром.

Затем дискуссия об углекислом газе как причине климатических колебаний приостановилась до 1930-х гг., когда был обнаружен положительный тренд средней глобальной температуры по отношению к концу XIX в. К этому времени Милутин Миланкович разработал теорию ледниковых периодов, обусловленных периодическими изменениями орбитальных параметров Земли (Milankovitch, 1941). Впрочем, не все современники Миланковича разделяли его теорию (Костицын, 1984).

В 1938 г. Гай Стюарт Каллендер, проанализировав накопившиеся к тому времени результаты наблюдений за температурой и концентрацией CO_2 в атмосфере, пришел к выводу, что рост первой обусловлен ростом второй (Callendar, 1938). Работы Каллендера привели к возобновлению дискуссии, начатой вокруг результатов Аррениуса. Сомнения специалистов вызывал широкий круг вопросов – от достоверности данных наблюдений и значимости трендов концентрации углекислого газа до интенсивности его поглощения океаном, а также сравнительного (с водяным паром) вклада CO_2 в поглощение уходящей длинноволновой радиации. Каллендера критиковали за игнорирование ряда действующих в реальном мире физических процессов, таких как атмосферная конвекция, насыщение атмосферы водяным паром при потеплении, образование облаков и их участие в перераспределении потоков радиации. Каллендер признал, что многие неучтенные им процессы, в частности, связанные с облаками, могут играть важную роль, однако получить количественные оценки вкладов разных процессов в потепление климата в то время было невозможно.

По окончании Второй мировой войны компьютеры открыли новую эпоху исследований атмосферы и океана – эпоху физико-математического моделирования климатической системы. В 1950-е гг. появились в определенном смысле реалистичные компьютерные модели глобальной атмосферы. В 1956 г. Гильберт Пласс с помощью компьютерных расчетов пришел к заключению, что добавка CO_2 в атмосферу способна оказать значительное влияние на радиационный баланс: для уд-

воения концентрации CO_2 он получил рост температуры на 3.6°C , а для сокращения концентрации CO_2 – падение температуры на 3.8°C (Plass, 1956). Правда, как и его предшественники, Пласс в своих расчетах не учитывал изменения влагосодержания атмосферы и облачности. Предположив сохранение антропогенных выбросов на уровне середины 1950-х гг. (т. е. $\sim 30\%$ за столетие), Пласс оценил дальнейшее возрастание глобальной температуры за счет хозяйственной деятельности человека в 1.1°C за столетие. Это несколько выше 0.7°C за XX в., однако, в своей оценке Пласс не учитывал термической инерции океана, способной замедлить реакцию климатической системы на радиационное воздействие. Им не учитывались и другие аспекты изменения состава атмосферы, также связанные с деятельностью человека.

В 1950-е гг. исследования радиоактивного изотопа углерода C^{14} , большое количество которого попало в климатическую систему Земли в результате испытаний ядерного оружия, позволили сделать вывод, что углекислый газ, попадая в атмосферу, довольно быстро в ней перемешивается как по горизонтали – от полюса до полюса, так и по вертикали – до верхних слоев стратосферы. Изотоп C^{14} также образуется в верхних слоях атмосферы под воздействием космических лучей, убывая затем в течение тысячелетий. Что касается “старого” углерода, содержащегося в ископаемом топливе, то в нем практически отсутствует радиоактивный изотоп. Таким образом, сжигание ископаемого топлива приводит к выбросу в атмосферу лишь нерадиоактивного углерода. В 1950-е гг. Ганс Зюсс (Suess, 1955) обнаружил, что содержание стабильного углерода C^{12} и C^{13} в годовых кольцах многовековых деревьев, относящихся к XX столетию, повышено, а C^{14} , соответственно, понижено. Этот эффект он объяснил увеличением поступления в атмосферу углекислого газа в результате сжигания ископаемого топлива.

В это же время Роджер Ревелл совместно с Зюссом (Revelle, Suess, 1957), а также, независимо от них, несколько других исследователей установили, что избыток углекислого газа в атмосфере, образующийся в результате сжигания ископаемого топлива, далеко не так быстро, как представлялось ранее, компенсируется поглощением CO_2 океаном.

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Работы Пласса, Зюсса, Ревелла, а также сразу вслед за ними – Берта Болина и Эрика Эрикссона (Bolin, Eriksson, 1959) вывели проблему антропогенного потепления на новый уровень общественного восприятия. Впоследствии, уже в начале 1960-х гг., в работах Болина и других проблема антропогенного изменения климата приобрела тревожное звучание, в конечном итоге оказавшись в одном ряду с крупнейшими глобальными вызовами человечеству.

В 1958 г. Чарльз Килинг начал измерения концентрации углекислого газа в атмосфере – сначала в Калифорнии, затем в Антарктиде и на Гавайях. Впоследствии антарктическая станция была закрыта, и основной стала гавайская обсерватория в Мауна Лоа, которая не прерывает измерений до настоящего времени. Килингу удалось довольно точно измерить концентрацию углекислого газа в атмосфере и обнаружить ее годовой рост (Keeling, 1960). В это время концентрация составляла 315 млн^{-1} , а средняя глобальная (5-летняя) температура – $+13.9^\circ\text{C}$.

Модельные исследования, проведенные Фрицем Меллером с помощью созданной им 1-мерной модели, показали, что учет обратной связи водяного пара делает модельный климат очень чувствительным к изменениям концентрации CO_2 (Moller, 1963).

В 1960-е гг. на передний план науки выдвинулись достижения Принстонской лаборатории в США. Сюкуро Манabe и Ричард Везеролд с помощью разработанной ими радиационно-конвективной модели выполнили расчет, убедительно продемонстрировавший, что удвоение CO_2 поднимет глобальную температуру на несколько градусов (Manabe, Wetherald, 1967). Эти расчеты показали, что средняя и нижняя облачность способствует понижению температуры у поверхности, в то время как верхняя – вызывает дополнительное потепление, а также – что рост концентрации CO_2 приводит к охлаждению стратосферы.

Кривая 3 на рисунке 2.1.1, взятом из работы Будыко (1972), показывает прогноз изменений

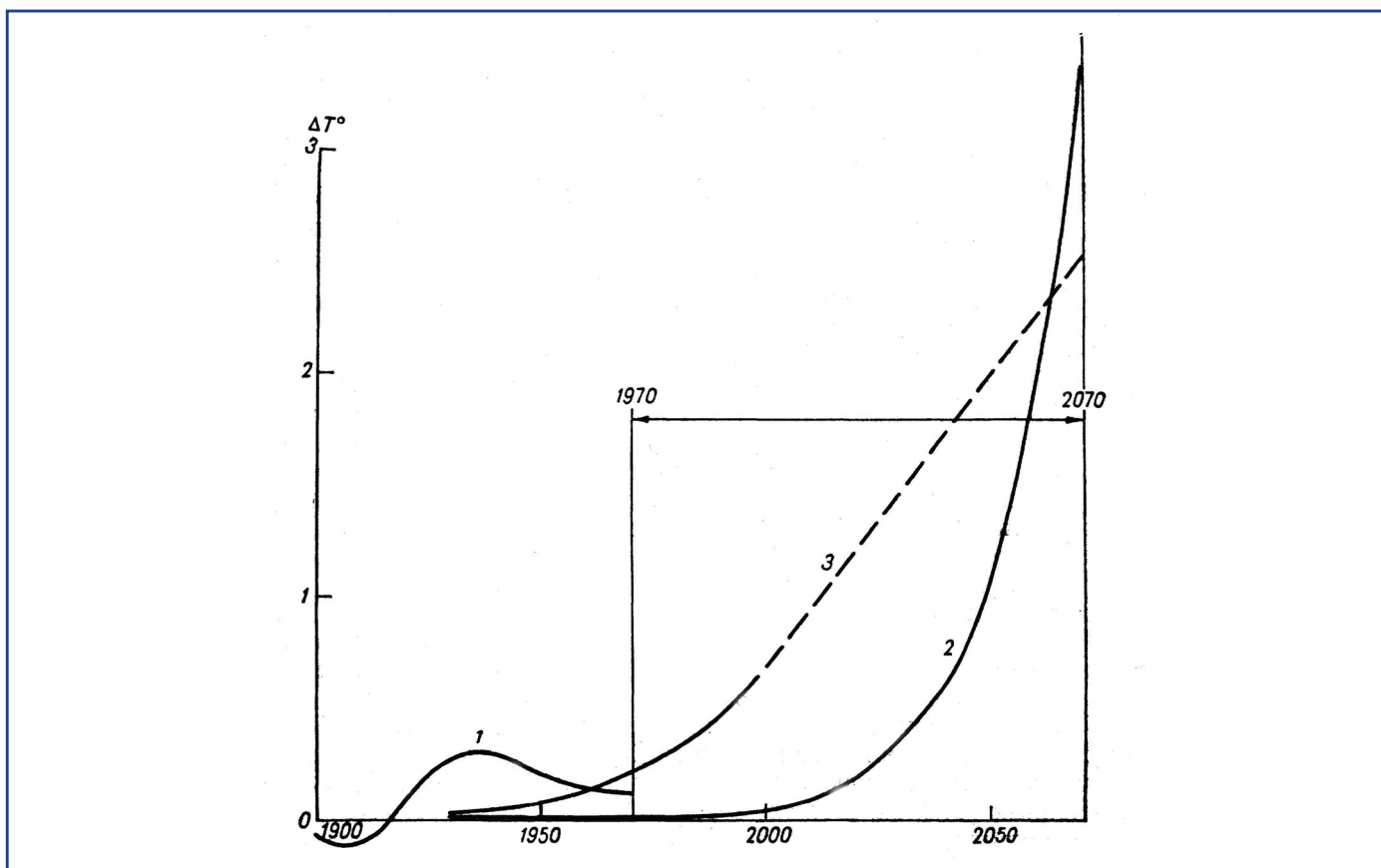


Рис. 2.1.1. Вековой ход аномалий температуры воздуха у земной поверхности: 1 – данные наблюдений; 2 – изменения, обусловленные ростом производства энергии; 3 – изменения, обусловленные ростом концентрации углекислоты. Рисунок из работы (Будыко, 1972).

2.1. ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИЧИНАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

глобальной приземной температуры на конец XX в. и далее, обусловленных ростом концентрации углекислоты в атмосфере. Прогноз основан на работе Манабе (Manabe, 1970). Используя радиационно-конвективную модель, на базе оценки будущих изменений атмосферной концентрации CO₂ на конец XX в., выполненной Департаментом ООН по экономическим и социальным вопросам, Манабе установил, что рост глобальной приземной температуры с 1900 по 2000 г. составит около 0.8°C. Сегодня производит сильное впечатление тот факт, что прогноз был выполнен за 30 лет до конца XX века, а полученный результат довольно хорошо воспроизвел наблюдаемые изменения глобальной температуры в последующие десятилетия.

В конце 1960-х гг. появились еще две простые модели, разработанные, соответственно, в СССР – Михаилом Ивановичем Будыко, и в США – Уильямом Селлерсом, с которыми некоторые специалисты связывают новую постановку проблемы изменения климата.

М. И. Будыко и его коллеги в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, отдавая себе отчет в чрезмерной упрощенности существовавших в то время моделей, пытались делать прогнозы изменения климата с использованием эмпирических моделей, основанных на данных о прошлых состояниях климатической системы. Результаты расчетов с построенной Будыко предельно простой, нульмерной моделью теплового баланса Земли указали на относительно устойчивую глобальную климатическую систему. Однако современное состояние климата Земли (температура, площадь снежного покрова) в модели Будыко находилось недалеко от “критической точки”, за которой климат переходил в новое состояние – с подъемом температуры, растаявшим льдом и более высоким уровнем океана, в соответствии с известными палеоклиматическими аналогами. За другой “критической точкой” в модели Будыко планету ждало глобальное оледенение, замерзшие океаны, состояние, названное Будыко “белая Земля” – климатическая катастрофа, способная уничтожить высшие формы жизни на планете (Будыко, 1968; Budyko, 1969). Экспоненциальный рост индустриализации, согласно расчетам Будыко, приводил к сильному глобальному потеплению (см. кривая 2 на рисунке 2.1.1); иными словами, Будыко констатировал неизбежность глобального потепления в ближайшее столетие (Будыко, 1972).

Уильям Селлерс рассчитал возможные отклонения для реальной атмосферы – отдельно в каждом широтном поясе (Sellers, 1969). Несмотря на то, что его модель использовала отличные от Будыко уравнения, результаты подтвердили, что климат опасно чувствителен к малым воздействиям – колебаниям солнечной активности или хозяйственной деятельности человека. Последняя очевидно, направляла глобальный климат в сторону потепления.

Несмотря на недоверие к простым моделям со стороны части научного сообщества, неверие в прогноз потепления и в саму возможность прогнозировать изменения климата, которые встретили Будыко и Селлерс, в 1970-е гг. парниковый эффект и возможное глобальное потепление вышли на первый план климатических исследований по целому ряду направлений. Попутно существенно углубились исследования других климатоформирующих факторов, в частности аэрозолей. В частности, исследования показали, что аэрозоли, связанные с человеческой деятельностью, противодействуют глобальному потеплению и могут привести к серьезному похолоданию (Bryson, Wendland, 1970; Кароль, 1977).

Наступила эпоха трехмерного физико-математического моделирования глобальной климатической системы.

2.1.3. Установление причин и прогноз климатических изменений

Дальнейшие исследования показали, что так называемые малые газовые примеси: озон, метан, окислы азота, хлорфторуглеродные соединения вносят свой вклад в парниковый эффект (Ramanathan, 1975; Wang et al., 1976; Кароль и др., 1983; Андропова и др., 1986; Ramanathan et al., 1987). В качестве важных факторов, оказывающих влияние на климат, были признаны сокращение площади лесов и другие изменения экосистем (Woodwell et al., 1978). Изменчивость солнечной активности также получила свою долю внимания в исследованиях изменений климата (Eddy, 1976; Kerr, 1991).

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

В 1979 г. администрация США обратилась к Национальной академии наук с запросом о чувствительности климата к CO_2 . Академия организовала группу экспертов под председательством авторитетного ученого Джула Чарни. В эту группу входили наиболее уважаемые эксперты, не участвовавшие в дебатах вокруг этой проблемы. Группа Чарни сравнила результаты расчетов с двумя независимыми (как в отношении “физического” содержания, так и математической реализации) 3-мерными сложными глобальными климатическими моделями, разработанными Манабе с коллегами из Принстонской лаборатории и Джеймсом Хансеном из НАСА. Группа обнаружила различия в деталях полученных результатов, но констатировала фундаментальное согласие их в главном: климат теплеет при росте концентрации CO_2 в атмосфере. Все прочие расчеты с использованием моделей, упрощенных разными способами и с использованием разных подходов, давали качественно один и тот же результат – глобальное потепление.

Модель Манабе показала, что при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере произойдет потепление, приблизительно, на 2°C , модель Хансена – на 4°C . Основываясь на этих оценках чувствительность глобального климата к удвоению CO_2 группа Чарни оценила как $1.5\text{--}4.5^\circ\text{C}$, с наиболее вероятным значением 3°C . Чарни признался тогда, что группа “постаралась, но не смогла найти какой-либо упущенный или недооцененный физический эффект” (National Academy of Sciences, 1979)*. В течение последующих многих лет появления новых сложных моделей, улучшения их пространственного разрешения и повышения реалистичности эта оценка если и корректировалась, то незначительно.

В СССР в этот период были выполнены оценки чувствительности климата к увеличению содержания CO_2 в атмосфере с помощью упрощенных энергобалансовых моделей, учитывающих различные обратные связи в климатической системе (Будыко, 1974; Мохов, 1981). Существенный вклад в развитие теории климата с помощью физико-математического моделирования был внесен Г. И. Марчуком и его сотрудниками (Мар-

чук, 1979; Дымников и др., 1980; и др.). В частности, разработанная ими зонально осредненная модель общей циркуляции атмосферы также использовалась для оценок чувствительности климата (Дымников и др., 1980). Другой подход к установлению пределов возможной чувствительности климатической системы к увеличению содержания CO_2 был основан на анализе данных о современных изменениях климата, полученных по материалам метеорологических наблюдений. Результаты выполненных работ в целом соответствовали диапазону оценок, полученных другими методами (Будыко, 1977а; 1977б; Винников, Гройсман, 1981; 1982). В качестве независимого подхода для оценки климатических условий в будущем использовались также палеоклиматические данные. В середине 1970-х годов были выполнены первые оценки возможных изменений климата при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере с использованием карт В. М. Сеницына для плейстоцена (Будыко и др., 1978). Этот подход получил дальнейшее развитие в целом ряде последующих работ (Будыко, 1979; 1980; Будыко и др., 1985; и др.). В качестве палеоклиматических аналогов климата XXI века использовались оптимум голоцена (6.2–5.3 тыс. лет т. н.), оптимум микулинского межледниковья (около 122–125 тыс. лет т. н.) и оптимум плейстоцена (4.3–3.3 млн лет т. н.). Подробный обзор выполненных работ представлен в монографии под редакцией М. И. Будыко и Ю. А. Израэля (Борзенкова и др., 1987).

В ходе Первой всемирной конференции по климату, организованная всемирной метеорологической организацией в 1979 г. в Женеве в числе 25 заказных докладов фигурировало четыре доклада от СССР – Е. К. Федорова, Г. И. Марчука, И. П. Герасимова и Ю. А. Израэля. Е. К. Федоров, выступивший с вводным докладом на этой конференции, в частности отметил: “Изменения климата в будущем неизбежны. Они станут заметными и, может быть, необратимыми в ближайшие несколько десятилетий... В связи с этим очевидно, что необходимо было бы выработать некоторую стратегию, т. е. систему заранее спланированных действий, которые обеспечили бы для челове-

* Последний, пятый оценочный доклад МГЭИК (IPCC, 2013) в точности подтвердил диапазон чувствительности климата, полученный группой Чарни.

2.1. ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИЧИНАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

ства избежание негативных последствий возможных изменений климата...” (Федоров, 1979).

С начала 1980-х гг. начались попытки воспроизвести наблюдаемые изменения климата с помощью сложных климатических моделей. В моделях стали имитироваться воздействия извержения вулканов, колебаний солнечной активности и роста концентрации парниковых газов. Успешная, в целом, попытка Хансена с коллегами воспроизвести таким образом эволюцию средней глобальной температуры в XX в. (Hansen et al., 1981) повысила доверие к оценкам будущих изменений климата, полученным с этой моделью. Результат Хансена оказался устойчивым – впоследствии способность воспроизводить наблюдаемую эволюцию климата при заданных наблюдаемых внешних воздействиях демонстрировали многие модели (учет загрязнения атмосферы выбросами аэрозоля промышленного происхождения улучшил картину (Mitchell et al., 1995; Santer et al., 1996)). Более того, комбинирование внешних воздействий в расчетах наблюдаемой эволюции климата стало одним из ключевых подходов в установлении причин изменения климата.

Успехи в воспроизведении наблюдаемого климата позволили Хансену с коллегами спрогнозировать обнаружение глобального потепления уже в 1990-е гг. Другие исследователи пришли к заключению, что антропогенное воздействие на климат начнет доминировать над остальными факторами в начале 2000-х гг. (Gilliland, 1982; Madden, Ramanathan, 1980). Эти прогнозы совпадали с ранее сделанными оценками Пласса, Ревела и Болина. Разумеется, эти прогнозы разделяли не все.

Мощное извержение филиппинского вулкана Пинатубо в 1991 г. и выброс в стратосферу около 20 миллионов тонн диоксида серы открыло новый период тестирования климатических моделей. В частности, модель, разработанная группой Хансена, сразу вслед за этим извержением предсказала примерно полуградусное снижение глобальной температуры, продолжавшееся в течение двух лет, как это впоследствии и случилось (Hansen et al., 1992). Ряд моделей впоследствии успешно воспроизвели реакцию глобальной температуры на указанное внешнее воздействие (Graf et al., 1993).

По мере возрастания доступных вычислительных ресурсов ведущие центры начали переходить от расчетов “равновесных” состояний к расчетам эволюции глобального климата. Помимо меняющегося во времени воздействия радиационно-активных примесей в атмосфере, стали проверяться и другие возможные климатоформирующие факторы, например, колебания солнечной активности. В 1995 г. три центра (Ливерморская лаборатория в США, Центр Хэдли в Великобритании и Институт Макса Планка в Германии) провели успешные эксперименты по воспроизведению изменений температуры в XX в. Им удалось не только воспроизвести вековой глобальный температурный тренд, но и географическую структуру изменений. Наиболее близкими к реальности были расчеты последних десятилетий XX в., когда рост концентрации парниковых газов в атмосфере стал доминировать над другими факторами. (Mitchell et al., 1995; Santer et al., 1996; Hasselmann et al., 1995).

В 1988 г. 45-я сессия Генеральной Ассамблеи ООН поручила Всемирной метеорологической организации и Программе ООН по окружающей среде учредить Межправительственную группу экспертов по изменению климата (МГЭИК) для подготовки оценочного доклада об ожидаемых последствиях изменения климата. Затем, на Конференции ООН по окружающей среде и развитию (1992 г., Рио-де-Жанейро) была принята для подписания Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК). Положения РКИК накладывают на ее участников определенные обязательства в области изучения изменения климата и принятию мер по защите климатической системы. Оценочные доклады МГЭИК представляют собой авторитетные и наиболее полные анализы научной литературы по проблеме изменения климата, которые служат основой в деятельности РКИК.

В Первом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 1990) приводится широкий обзор состояния науки об изменении климата, обсуждение неопределенностей и свидетельств потепления.

Второй оценочный доклад МГЭИК (IPCC, 1996) утверждает: “баланс свидетельств предполагает наличие различного влияния человека на глобальный климат”.

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Третий доклад МГЭИК (IPCC, 2001) приходит к заключению, что “большая часть потепления последних 50 лет с вероятностью > 66% может быть отнесена к деятельности человека”.

Начало XXI века отмечено нарастанием усилий ведущих центров моделирования климата по воспроизведению наблюдаемой эволюции климатической системы на протяжении периода инструментальных наблюдений. Именно эти эксперименты заложили основу активно развивающегося в настоящее время направления науки о климате – обнаружения и установления причин наблюдаемых изменений климата. Обзор вклада российских ученых в эти исследования представлен в работах (Мохов, 2004; 2009; 2013).

В пользу антропогенной природы наблюдаемого потепления убедительно свидетельствует сравнение данных наблюдений и результатов двух серий модельных расчетов эволюции климата XX – начала XXI веков, где в одной серии учитывались и антропогенные, и естественные внешние воздействия на климатическую систему Земли, а в другой только естественные внешние воздействия. Прямое сравнение данных наблюдений за глобальной температурой приземного воздуха с результатами модельных расчетов показало, что только в экспериментах, учитывающих антропогенные внешние воздействия, хорошо воспроизводится наблюдаемое повышение температуры. В экспериментах, где антропогенные воздействия не учи-

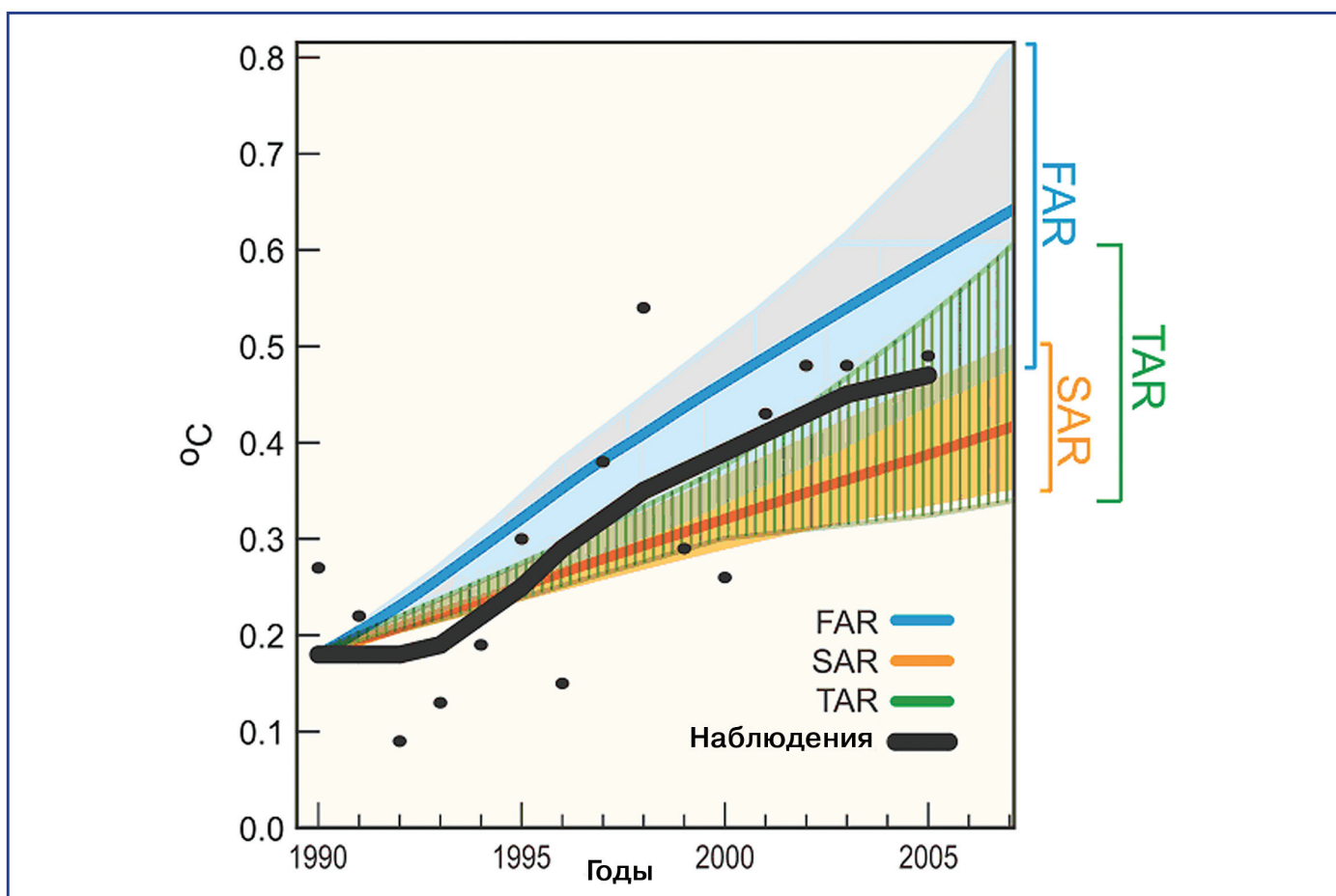


Рис. 2.1.2. Аномалии среднегодовой глобальной приземной температуры по отношению к периоду 1961–1990 по данным наблюдений (Brohan et al., 2006) и оценкам Первого (FAR), Второго (SAR) и Третьего (TAR) оценочных докладов МГЭИК (IPCC, 1990; IPCC, 1996; IPCC, 2001). “Лучшие оценки” по модельным расчетам FAR и SAR показаны жирными линиями, тогда как затенением соответствующего цвета указаны прогнозируемые диапазоны возможных значений. В Третьем оценочном докладе (TAR) нет “лучшей оценки”, а соответствующий диапазон возможных значений указан на рисунке штриховкой. Наблюдаемые среднегодовые значения показаны черными точками, а черная кривая, отражающая долгопериодные изменения, получена из среднегодовых значений путем сглаживания с помощью 13-точечного фильтра. Рисунок из работы (Le Treut et al., 2007).

2.1. ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИЧИНАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

тываются, температура в последние десятилетия XX века понижается (см. рисунок 2.2.1). Подробное обсуждение этих исследований можно найти в (Hegerl et., 2007; Спорышев и др., 2008; глава 2.2).

Четвертый доклад МГЭИК (IPCC, 2007) констатирует: “Потепление не вызывает сомнений”, и “большая часть потепления последних 50 лет с вероятностью > 90% является следствием роста парниковых газов”. Кроме того, доклад отмечает, что содержание парниковых газов в атмосфере достигло беспрецедентного уровня, и они вынуждают климат меняться. Влияние антропогенного воздействия на температуру приземного воздуха обнаружено не только глобально, но и отдельно на каждом континенте, за исключением Антарктиды, где недостаточно данных наблюдений для достоверных выводов. Выявлено влияние человека на повышение температуры верхнего 700-метрового слоя Мирового океана.

По прошествии более двух десятков лет со времени опубликования первых оценок МГЭИК, относящихся к будущим климатическим изменениям, представляет определенный интерес сопоставление этих оценок с фактическими изменениями климата. Разумеется, модельные оценки будущих изменений климата не являются прогнозами (см., напр., (Катцов и др., 2008)).

Наблюдаемое изменение средней глобальной температуры за период 1990–2005 гг. в целом оказывается в пределах модельных оценок ранних докладов МГЭИК (рис. 2.1.2). Следует отметить, что сценарии возможных в будущем внешних воздействий, использовавшиеся в ранних оценках (Первый и Второй оценочные доклады МГЭИК), основаны на существенно менее сложных и детализированных предпосылках, нежели последующие сценарии SRES (Nakicenovic, 2000) (Третий и Четвертый оценочные доклады МГЭИК). Например, в Первом оценочном докладе сценарии внешних воздействий не учитывали будущих распределений аэрозоля.

2.1.4. Литература

Андропова Н. Г., Бабанова В. В., Кароль И. Л., Киселев А. А., Кудрявцев А. П., Морозова И. А., Розанов Е. В., Фролькис В. А., 1986. Радиационно-фотохимические модели атмосферы, И. Л. Кароль (ред.). Главная геофизи-

ческая обсерватория им. А. И. Воейкова. Л., Гидрометеиздат, 192 с.

БСЭ, 1971. Большая советская энциклопедия, А. М. Прохоров (гл. ред.), изд. 3-е. т. 6. Газлифт–Гоголево. М., “Советская энциклопедия”, 624 с.

БСЭ, 1976. Большая советская энциклопедия, А. М. Прохоров (гл. ред.), изд. 3-е. т. 25. Струнино–Тихорецк. М., “Советская энциклопедия”, 600 с.

Борзенкова И. И., Будыко М. И., Бютнер Э. К., Величко А. А., Винников К. Я., Голицын Г. С., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Кобак К. И., Кузьмин И. И., Легасов В. А., Менжулин Г. В., 1987. Антропогенные изменения климата, М. И. Будыко, Ю. А. Израэль (ред.). Л., Гидрометеиздат, 406 с.

Будыко М. И., 1968. О происхождении ледниковых эпох, Метеорология и гидрология, № 11, с. 3–12.

Будыко М. И., 1972. Влияние человека на климат. Л., Гидрометеиздат. 47 с.

Будыко М. И., 1974. Изменения климата. Л., Гидрометеиздат. 280 с.

Будыко М. И., 1977а. Исследование современных изменений климата, Метеорология и гидрология, № 10, с. 3–10.

Будыко М. И., 1977б. Современное изменение климата. Л., Гидрометеиздат. 47 с.

Будыко М. И., 1979. Полуэмпирическая модель термического режима атмосферы и реальный климат, Метеорология и гидрология, № 4, с. 5–17.

Будыко М. И., 1980. Климат в прошлом и будущем. Л., Гидрометеиздат. 352 с.

Будыко М. И., Винников К. Я., Дроздов О. А., Ефимова Н. А., 1978. Предстоящие изменения климата, Изв. АН СССР. Сер. геогр. № 6, с. 5–20.

Будыко М. И., Ронов А. Б., Яншин А. Л., 1985. История атмосферы. Гидрометеиздат, 209 с.

Винников К. Я., Гройсман П. Я., 1981. Эмпирический анализ влияния CO₂ на современные изменения средней годовой приземной температуры воздуха северного полушария, Метеорология и гидрология, № 11, с. 30–43.

Винников К. Я., Гройсман П. Я., 1982. Эмпирическое исследование чувствительности кли-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

- мата, Изв. АН СССР, ФАО, т. 18, № 11, с. 1159–1169.
- Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 2003.** Колебания и изменения климата на территории России, Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 39, № 2, с. 1–20.
- Дымников В. П., Галин В. Я., Перов В. Л., 1980.** Исследование чувствительности климата к удвоению CO_2 с помощью зонально-средненной модели общей циркуляции атмосферы. В кн.: Математические модели атмосферных движений (математическое моделирование динамики атмосферы и океана). 2 часть, Сборник научных трудов ВЦ СО АН СССР, Г. И. Марчук (ред.). Новосибирск. ВЦ СО АН СССР, с. 39–59.
- Кароль И. Л., 1977.** Изменение глобального содержания стратосферных аэрозолей и их связь с колебаниями средней прямой солнечной радиации и температуры у поверхности Земли, Метеорология и гидрология, № 3, с. 32–40.
- Кароль И. Л., Розанов Е. В., Тимофеев Ю. М., 1983.** Газовые примеси в атмосфере. Л., Гидрометеоздат. 192 с.
- Катцов В. М., Мелешко В. П., Говоркова В. А., Надежина Е. Д., Павлова Т. В., Школьник И. М., 2008.** Модели, предназначенные для оценки будущих изменений климата, Оценочный Доклад Росгидромета “Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации” А. И. Бедрицкий и др., (ред.), т. 1, с. 112–151.
- Костицын В. А., 1984.** Эволюция атмосферы, биосферы и климата. (V. A. Kostizin, 1935. Evolution de l’atmosphere. Circulation organique. Epoque glaciaires. Pars, Hermann) Пер. с франц. Под ред. и с послесловием Н. Н. Моисеева. М., Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 96 с.
- Марчук Г. И., 1979.** Моделирование изменений климата и проблема долгосрочного прогноза погоды, Метеорология и гидрология, № 7, с. 25–36.
- Монин А. С., 1982.** Введение в теорию климата. Л., Гидрометеоздат, 247 с.
- Мохов И. И., 1981.** О влиянии CO_2 на термический режим земной климатической системы, Метеорология и гидрология, № 4, с. 24–34.
- Мохов И. И., 2004.** Российские климатические исследования в 1999–2002 гг., Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана, т. 40. № 2, с. 147–155.
- Мохов И. И., 2009.** Российские климатические исследования в 2003–2006 гг., Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 45. № 2, с. 180–192.
- Мохов И. И., 2013.** Результаты российских исследований климата в 2007–2010 гг., Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 49. № 1. с. 3–18.
- Спорышев П. В., Мирвис В. М., Катцов В. М., Мелешко В. П., Ранькова Э. Я., 2008.** Антропогенный вклад в изменение климата. Оценочный Доклад Росгидромета “Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации” А. И. Бедрицкий и др., (ред.), т. 1, с. 152–173.
- Федоров Е. К., 1979.** Изменения климата и стратегия человечества, Метеорология и гидрология, № 7, с. 12–24.
- Arrhenius S., 1896.** On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground, Philosophical Magazine, vol. 41, pp. 237–276.
- Bolin B., Eriksson E., 1959.** Changes in the Carbon Dioxide Content of the Atmosphere and Sea Due to Fossil Fuel Combustion, In: The Atmosphere and the Sea in Motion, Bert Bolin (ed.), New York, Rockefeller Institute Press. p. 130–142.
- Brohan P., Kennedy J. J., Harris I., Tett S. F. B., Jones P. D., 2006.** Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, J. Geophys. Res., vol. 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.
- Bryson R. A., Wendland W. M., 1970.** Climatic Effects of Atmospheric Pollution, In: Global Effects of Environmental Pollution, S. F. Singer (ed.), New York, Springer-Verlag. pp. 130–138.
- Budyko M. I., 1969.** The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth, Tellus, vol. 21, pp. 611–619.
- Callendar G. S., 1938.** The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Climate, Quarterly J. Royal Meteorological Society, vol. 64, pp. 223–240.

2.1. ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИЧИНАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

- Chamberlin T. C., 1897.** A Group of Hypotheses Bearing on Climatic Changes, *J. Geology*, vol. 5, pp. 653–683.
- Eddy J. A., 1976.** The Maunder Minimum. *Science*, vol. 192, pp. 1189–1202.
- Edwards P. N., 2010.** *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming.* Cambridge, MA, MIT Press. 552 p.
- Fourier J., 1827.** Memoire sur la temperature du globe terrestre et des espaces planetaires, *Memoires de l'Academie des sciences de l'Institut de France*, vol. 7, pp. 569–604.
- Gilliland R. L., 1982.** Solar, Volcanic, and CO₂ Forcing of Recent Climatic Changes, *Climatic Change*, vol. 4, pp. 111–131.
- Graf H.-F., Kirchner I., Robock A., Schult I., 1993.** Pinatubo eruption winter climate effects: model versus observations, *Climate Dynamics*, vol. 9, pp. 81–93.
- Hansen J. E., Johnson D., Lacis A., Lebedeff S., Lee P., Rind D., Russell G., 1981.** Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, *Science*, vol. 213, pp. 957–966.
- Hansen J. E., Lacis A., Ruedy R., Sato M., 1992.** Potential Climate Impact of Mount Pinatubo Eruption, *Geophysical Research Letters*, vol. 19, pp. 215–218.
- Hasselmann K., Bengtsson L., Cubasch U., Hegerl G. C., Rodhe H., Roeckner E., von Storch H., Voss R., Waszkewitz J., 1995.** Detection of Anthropogenic Climate Change using a Fingerprint Method, *Max-Planck-Institut fur Meteorologie, Rep. 168*, 20 p.
- Hegerl G. C., Zwiers F. W., Braconnot P., Gillett N. P., Luo Y., Marengo Orsini J. A., Nicholls N., Penner J. E., Stott P. A., 2007.** Understanding and Attributing Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 663–745.
- Hulburt E. O., 1931.** The Temperature of the Lower Atmosphere of the Earth, *Physical Review*, vol. 38: pp. 1876–1890.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1990.** *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report Prepared for IPCC by Working Group I*, Houghton J. T., et al. (eds.), Cambridge. Cambridge University Press. 410 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1996.** *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Houghton J. T., et al. (eds.), Cambridge. Cambridge University Press. 572 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001.** *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC*, Houghton J.T., et al. (eds.), Cambridge. Cambridge University Press. 881 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007.** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013.** *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Stocker, T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Keeling C. D., 1960.** The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere, *Tellus*, vol. 12, pp. 200–203.
- Kerr R.A., 1991.** Could the Sun Be Warming the Climate? *Science*, vol. 254, pp. 652–653.
- Le Treut H., Somerville R., Cubasch U., Ding Y., Mauritzen C., Mokssit A., Peterson T., Prather M., 2007.** Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of*

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

- Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 93–127.
- Madden R. A., Ramanathan V., 1980.** Detecting Climate Change Due to Increasing Carbon Dioxide. *Science*, vol. 209, pp. 763–768.
- Manabe S., 1970.** The Dependence of Atmospheric Temperature on the Concentration of Carbon Dioxide. In: *Global Effects of Environmental Pollution*. Singer S. F. (ed.), Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, pp. 25–29.
- Manabe S., Wetherald R. T., 1967.** Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, *J. Atmospheric Sciences*, vol. 24, pp. 241–259.
- Milankovitch M., 1941.** *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*: Belgrade, Koniglich Serbische Akademie, 633 pp.
- Mitchell J. F. B., Johns T. C., Gregory J. M., Tett S. F. B., 1995.** Climate Response to Increasing Levels of Greenhouse Gases and Sulphate Aerosols, *Nature*, vol. 376, pp. 501–504.
- Moller F., 1963.** On the Influence of Changes in the CO₂ Concentration in Air on the Radiation Balance of the Earth's Surface and on the Climate, *J. Geophysical Research*, vol. 68, pp. 3877–3886.
- Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T. Y., Kram T., La Rovere E. L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., 2000.** Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 p.
- National Academy of Sciences, Climate Research Board, 1979.** *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment* (Jule Charney, Chair). Washington, DC, National Academy of Science, 22 p.
- Plass G. N., 1956.** The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change, *Tellus*, vol. 8, pp. 140–154.
- Ramanathan V., 1975.** Greenhouse Effect Due to Chlorofluorocarbons, *Climatic Implications*. *Science*, vol. 190, pp. 50–52.
- Ramanathan V., Callis L., Cess R., Hansen J., Isaksen I., Kuhn W., Lacis A., Luther F., Mahlman J., Reck R., Schlesinger M., 1987.** Climate-chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases, *Rev. Geophys*, vol. 25, pp. 1441–1482.
- Revelle R., Suess H. E., 1957.** Carbon Dioxide Exchange between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ During the Past Decades, *Tellus*, vol. 9, pp. 18–27.
- Santer B. D., Taylor K. E., Wigley T. M. L., Johns T. C., Jones P. D., Karoly D. J., Mitchell J. F. B., Oort A. H., Penner J. E., Ramaswamy V., Schwarzkopf M. D., Stouffer R. J., Tett S., 1996.** A Search for Human Influences on the Thermal Structure of the Atmosphere, *Nature*, vol. 382, pp. 39–46.
- Sellers W. D., 1969.** A Global Climatic Model Based on the Energy Balance of the Earth-Atmosphere System, *J. Applied Meteorology*, vol. 8, pp. 392–400.
- Suess H. E., 1955.** Radiocarbon Concentration in Modern Wood, *Science*, vol. 122, pp. 415–417.
- Tyndall J., 1861.** On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connection of Radiation, Absorption, and Conduction, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 151, pp. 1–36.
- Wang W. C., Yung Y. L., Lacis A. A., Mo T., Hansen J. E., 1976.** Greenhouse Effects Due to Man-Made Perturbations of Trace Gases, *Science*, vol. 194, pp. 685–690.
- Weart S., 2008.** *The discovery of global warming*, Cambridge, MA, Harvard University Press. 200 p.
- Woodwell G. M., Whittaker R. H., Reiners W. A., Likens G. E., Delwiche C. C., Botkin D. B., 1978.** The Biota and the World Carbon Budget, *Science*, vol. 199, pp. 141–146.

2.2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

Глава 2.2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

П. В. Спорышев

2.2.1. Введение

В настоящей главе обсуждаются причины наблюдаемых глобальных климатических изменений. Принципиальный подход к проблеме остается неизменным со времени выхода ОД_РФ-1. Выявление причин климатических изменений основывается на сравнении наблюдаемых изменений с ожидаемой реакцией на предполагаемые внешние воздействия, полученной с помощью тщательно выверенных климатических моделей. При сравнении используются статистические процедуры, позволяющие объективно установить согласуются ли количественно изменения, наблюдаемые в климатической системе, с ожидаемыми изменениями, полученными в модельных расчетах. Кроме того, проверяется, что указанные изменения не могут быть вызваны другими физически возможными механизмами. В частности проверяется, не являются ли они, просто, проявлением естественной изменчивости, свойственной климатической системе (Спорышев и др., 2008).

За прошедшие годы свидетельства влияния человека на климат стали более весомыми. В настоящее время более полные и продолжительные данные наблюдений и расчеты с новым поколением климатических моделей позволяют обнаруживать антропогенное влияние в наблюдаемых изменениях в большем числе компонентов климатической системы. 5-ый Оценочный доклад МГЭИК (ОД5 МГЭИК) констатирует, что с вероятностью большей 95% влияние человека было доминирующей причиной потепления, наблюдаемого с середины XX века (Stocker et al., 2013). Согласованность наблюдаемых и расчетных изменений во всей климатической системе Земли, включая глобальные и региональные температуры, температуру тропосферы и стратосферы, глобальный влагооборот, глобальный баланс энергии, изменения в криосфере и Мировом океане, указывает на то, что наблюдаемые климатические изменения вызваны в первую очередь увеличением концентраций атмосферных парниковых газов вследствие хозяйственной деятельности человека.

В последующих разделах более детально рассматриваются изменения в компонентах климатической системы, которые являются ключевыми для выявления антропогенного влияния на климат. Обзор в основном опирается на ОД5 МГЭИК с учетом работ, вышедших после его опубликования, а также русскоязычных работ не отраженных в докладе.

2.2.2. Изменения в ключевых компонентах климатической системы Земли

Основой для прогнозирования будущих климатических изменений, а также установления причин наблюдаемых изменений являются расчеты с современными полными климатическими моделями, выполняемые в рамках Международного проекта сравнения совместных моделей (СМIP). Новые климатические расчеты, выполненные в рамках 5-й фазы СМIP (СМIP5), обладают рядом преимуществ по сравнению с предыдущими расчетами, выполненными в рамках 3-й фазы проекта (СМIP3). В частности, увеличено пространственное разрешение моделей, улучшены схемы параметризации физических процессов, более полно учитывается влияние аэрозолей на климат. Подробнее этот вопрос обсуждается в разделе 3.1.2 настоящего доклада. Для задач, рассматриваемых в настоящей главе, наиболее важным является проведение в рамках СМIP5 специальных экспериментов, направленных на установление причин наблюдаемых климатических изменений. В рамках СМIP3 аналогичные расчеты проводились с меньшим числом моделей и в меньшем объеме. В частности, для большинства моделей СМIP5 кроме исторических расчетов, учитывающих все внешние воздействия на климатическую систему Земли и естественной, и антропогенной природы, представлены также расчеты, в которых отдельно учитываются заданные по данным наблюдений естественные внешние воздействия и изменения концентрации в атмосфере хорошо перемешанных парниковых газов. К естественным внешним воздействиям, в частности, относятся изменения величины приходящей сол-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

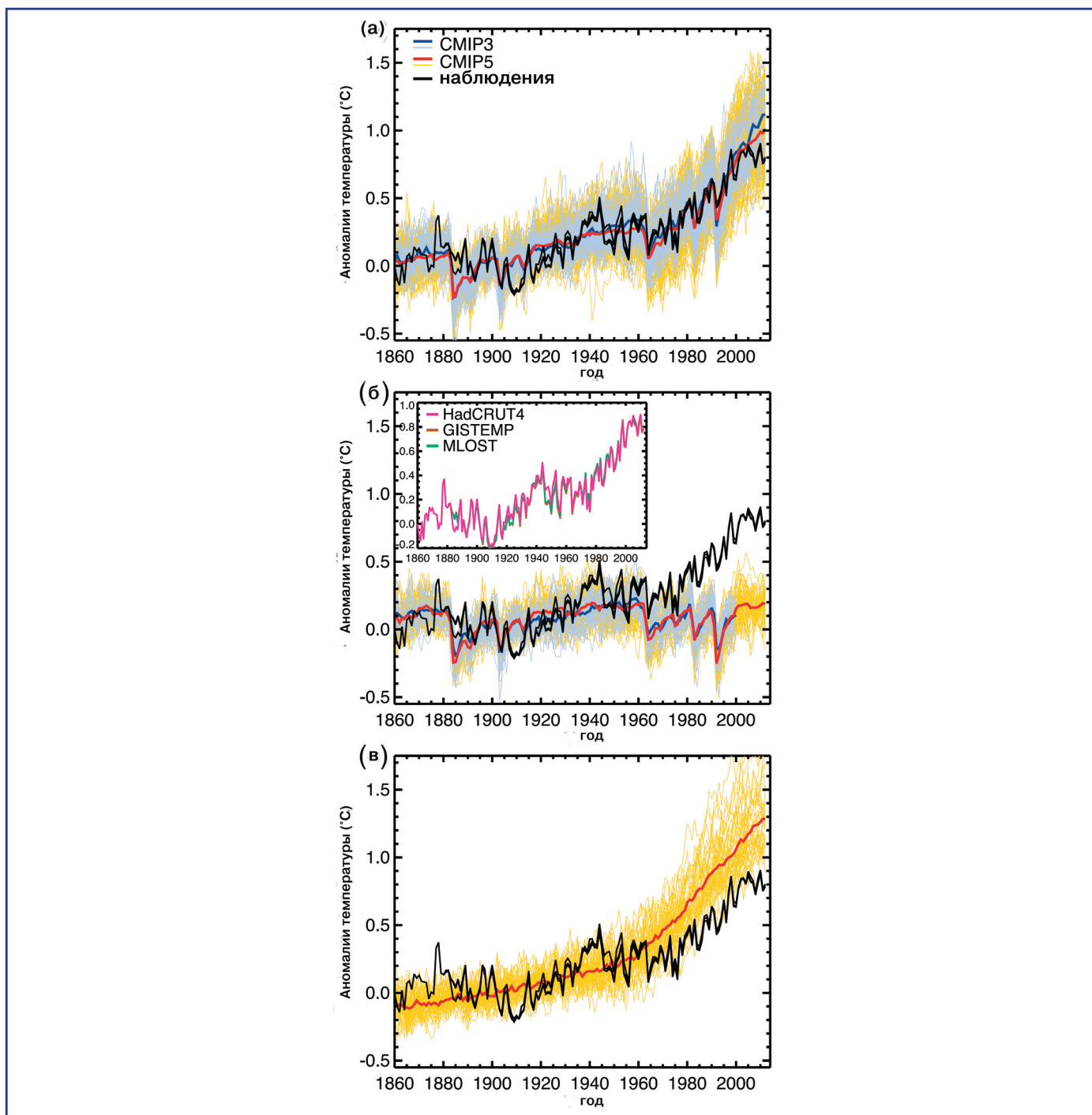


Рис. 2.2.1. Три оценки средней глобальной приземной температуры (черные линии) по данным наблюдений HadCRUT4, GISTEMP и MLOST сравниваются с модельными расчетами [по ансамблям CMIP3 – синие линии, и CMIP5 – желтые линии] при учете и антропогенных, и естественных внешних воздействий (а), только естественных воздействий (б) и только влияния роста парниковых газов (с). Жирные красные и синие линии показывают средние по модельным ансамблям CMIP5 и CMIP3, соответственно. Модельные расчеты по ансамблю CMIP3, учитывающие только влияние роста парниковых газов, не представлены на рисунке (в). Данные наблюдений и результаты модельных расчетов географически осреднены в соответствии с имеющимися данными наблюдений по архиву HadCRUT4 (поскольку пространственное покрытие у этого архива наименьшее) и представлены в виде аномалий по отношению к периоду 1880–1919 гг., хотя первоначально температурные данные в каждой ячейке сетки были получены как аномалии по отношению к периоду 1961–1990 гг. В отдельном прямоугольнике на рисунке б разными цветами показаны три оценки по разным архивам данных наблюдений. Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013), основанный на работе (Jones et al., 2013).

2.2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

нечной радиации и изменения концентрации в атмосфере аэрозолей вулканического происхождения, а к антропогенным – изменения концентрации в атмосфере парниковых газов и аэрозолей антропогенного происхождения, а также изменения в землепользовании. Сравнение результатов исторических расчетов по мультимодельным ансамблям с различными внешними воздействиями позволяет получить прямое визуальное представление о соответствии наблюдаемых изменений расчетным и на его основе сделать предварительные выводы о возможных причинах климатических изменений.

На рис. 2.2.1 представлена эволюция средней глобальной приземной температуры за период инструментальных наблюдений по данным наблюдений и по модельным расчетам. Рисунок основан на работе (Jones et al., 2013). Отметим, что на вставке в рис. 2.2.1б представлены наблюдаемые изменения температуры по трем различным архивам данных (HadCRUT4, GISTEMP и MLOST), что позволяет оценить уровень неопределенности в данных наблюдений. Сравнение расчетов по мультимодельным ансамблям CMIP5 и CMIP3 при учете всех внешних воздействий с данными наблюдений (рис. 2.2.1а) показывает хорошее согласие. Наблюдаемые колебания температуры попадают в межмодельный разброс, практически, каждый год, и ансамблевые средние достаточно близки к наблюдениям. Такого не происходит, когда в расчетах учитываются только естественные внешние воздействия (рис. 2.2.1б). В этом случае наблюдаемое во второй половине XX века потепление в модельных расчетах полностью отсутствует. Отметим, что на обоих рисунках и в наблюдениях, и модельных расчетах явно прослеживаются последствия крупнейших вулканических извержений: Кракатау (1883 г.), Санта-Мария (1902 г.), Агунг (1963 г.), Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1992 г.). Отметим также, что разброс в мультимодельном ансамбле CMIP5 заметно больше, чем в ансамбле CMIP3. Среди возможных причин этого в работе (Jones et al., 2013) отмечается увеличение числа моделей в ансамбле CMIP5, а также то, что в большем числе моделей в этом ансамбле учитываются изменения в землепользовании, а также изменения концентрации в атмосфере большего числа типов аэрозолей, причем в раз-

ных моделях могут использоваться разные параметризации этих воздействий. Когда в расчетах учитываются только изменения концентрации в атмосфере хорошо перемешанных парниковых газов, то модели показывают потепление во второй половине 20-го века существенно большее наблюдаемого и наблюдаемые колебания температуры во многие годы не попадают в межмодельный разброс (рис. 2.2.1в).

Пространственная структура изменений среднегодовой температуры приземного воздуха показана на рис. 2.2.2. На рисунке представлены линейные тренды в наблюдаемой и расчетных температурах за периоды 1901–2010 гг., 1901–1950 гг., 1951–2010 гг. и 1979–2010 гг. Данные наблюдений взяты из архива HadCRUT4, и модельные тренды рассматриваются только в тех точках, где имеется достаточно данных наблюдений. Для периода 1901–2010 гг. наблюдения показывают потепление почти во всех точках с наибольшим потеплением на континентах в высоких и средних широтах Северного полушария. Небольшое похолодание наблюдается в Северной Атлантике южнее Гренландии. Отметим, что на суше температура увеличивается быстрее, чем на океанах, что особенно ясно видно при рассмотрении периода 1951–2010 гг. Модельный анализ, выполненный в работе (Воег, 2011), показал, что более медленное потепление океанов определяется не только температурной инерцией воды, но в значительной степени обусловлено переносом избыточного тепла, образующегося при увеличении концентрации парниковых газов в атмосфере, от океанов, особенно из области экваториального Тихого океана, к континентам.

На рис. 2.2.2 модельные расчеты представлены тремя ансамблями, различающимися учетом внешних воздействий на климатическую систему Земли. Сравнение экспериментов по ансамблю historical, в котором в расчетах учитываются все внешние воздействия и антропогенные, и естественные, с данными наблюдений показывает лучшее по всем ансамблям согласие с наблюдениями во все рассматриваемые периоды. Для периодов 1901–2010 гг. и 1951–2010 гг. наблюдаемые изменения в более чем 85% ячеек сетки попадают в центральные 90% разброса по модельному ан-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

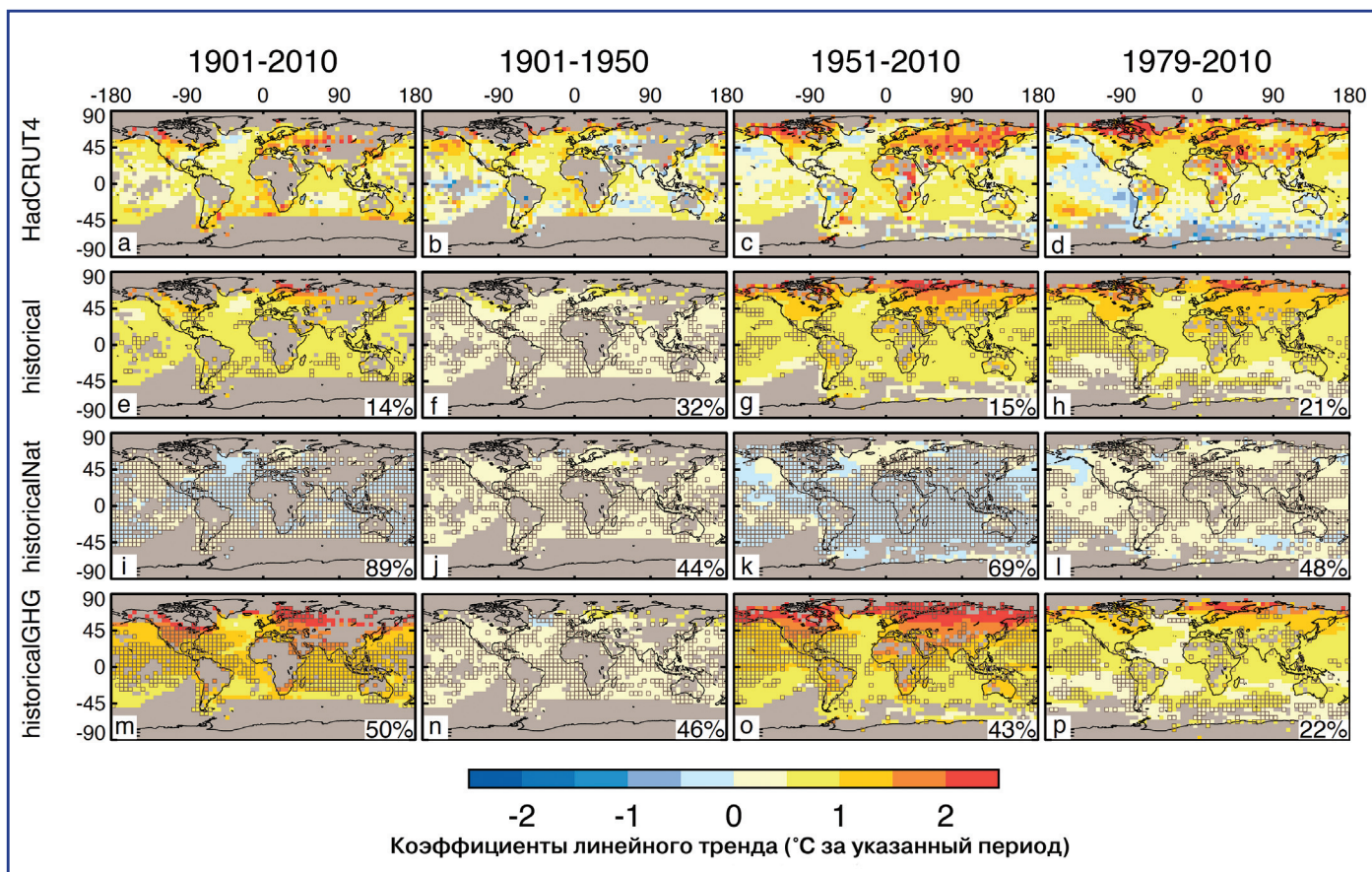


Рис. 2.2.2. Линейные тренды в наблюдаемой и расчетной среднегодовой приземной температуре (град. С за соответствующий период) за периоды 1901–2010 (a, e, i, m), 1901–1950 (b, f, j, n), 1951–2010 (c, g, k, o) и 1979–2010 гг. (d, h, l, p). Тренды в температуре по данным архива HadCRUT4 (a–d), по модельным расчетам CMIP3 и CMIP5 с учетом антропогенных, и естественных внешних воздействий (e–h), по модельным расчетам CMIP3 и CMIP5 с учетом только естественных воздействий (i–l), по модельным расчетам CMIP3 и CMIP5 с учетом только роста атмосферной концентрации парниковых газов (m–p). Тренды показаны только в точках, где имеется достаточно данных наблюдений в архиве HadCRUT4, а точки, где данных наблюдений недостаточно для установления тренда, окрашены серым цветом. На рисунках e–p прямоугольниками с серыми границами отмечены ячейки сетки, где наблюдаемые тренды выходят за границы 5-й и 95-й перцентилей модельных распределений, и доля числа таких ячеек (%) по отношению к общему числу ячеек, где рассчитывался тренд, показана в правом нижнем углу. Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013), основанный на работе (Jones et al., 2013).

самблю. Отметим одну особенность в структуре трендов потепления, которая особенно важна для территории России. При рассмотрении структуры потепления в Евразии в период 1951–2010 гг. видно существенное различие между модельными расчетами и данными наблюдений. По модельным расчетам наиболее быстро потепление происходит в высоких широтах, образуя так называемое полярное усиление, а по данным наблюдений зона быстрого потепления расположена южнее, в средних широтах. При рассмотрении периода 1979–2010 гг. это различие уже не так заметно, поскольку наблюдаемое потепление происходит с

примерно одинаковой скоростью и в высоких, и в средних широтах.

Два других модельных ансамбля демонстрируют существенные различия с данными наблюдений. В ансамбле historicalNat, в котором в модельных расчетах учитываются только естественные внешние воздействия, глобального потепления нет, а наблюдаемые тренды в периоды 1901–2010 гг. и 1951–2010 гг. более чем в двух третях ячеек сетки выходят за границы 90% разброса по модельному ансамблю. В ансамбле historicalGHG, в котором в модельных расчетах учитывается только влияние роста атмосферной

2.2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

концентрации парниковых газов, потепление в периоды 1901–2010 гг. и 1951–2010 гг. заметно больше наблюдаемого и наблюдаемые тренды выходят за границы 90% разброса по модельному ансамблю более чем в 40% ячеек сетки. Этого и следовало ожидать, поскольку в расчетах не учитывается охлаждающий эффект аэрозолей антропогенного и естественного происхождения.

К настоящему времени выполнено довольно много работ, в которых используются формальные статистические методы для выделения вклада отдельных внешних воздействий на климатическую систему Земли в наблюдаемое глобальное потепление. Каждому из возможных внешних воздействий соответствует своя пространствен-

но-временная структура отклика климатической системы на это воздействие (“климатический сигнал”). Структура отклика на рассматриваемое воздействие выводится из специальных экспериментов с МОЦАО, а затем статистическими методами устанавливается доля вклада отдельных внешних воздействий в наблюдаемую картину температурных (или иных) климатических изменений. Отметим, что при статистическом анализе принимается в расчет возможность того, что модели недооценивают или, наоборот, переоценивают влияние отдельных факторов.

В работе (Bindoff et al., 2013) дан краткий обзор современных результатов таких исследований. В расчетах, на которых основывались эти

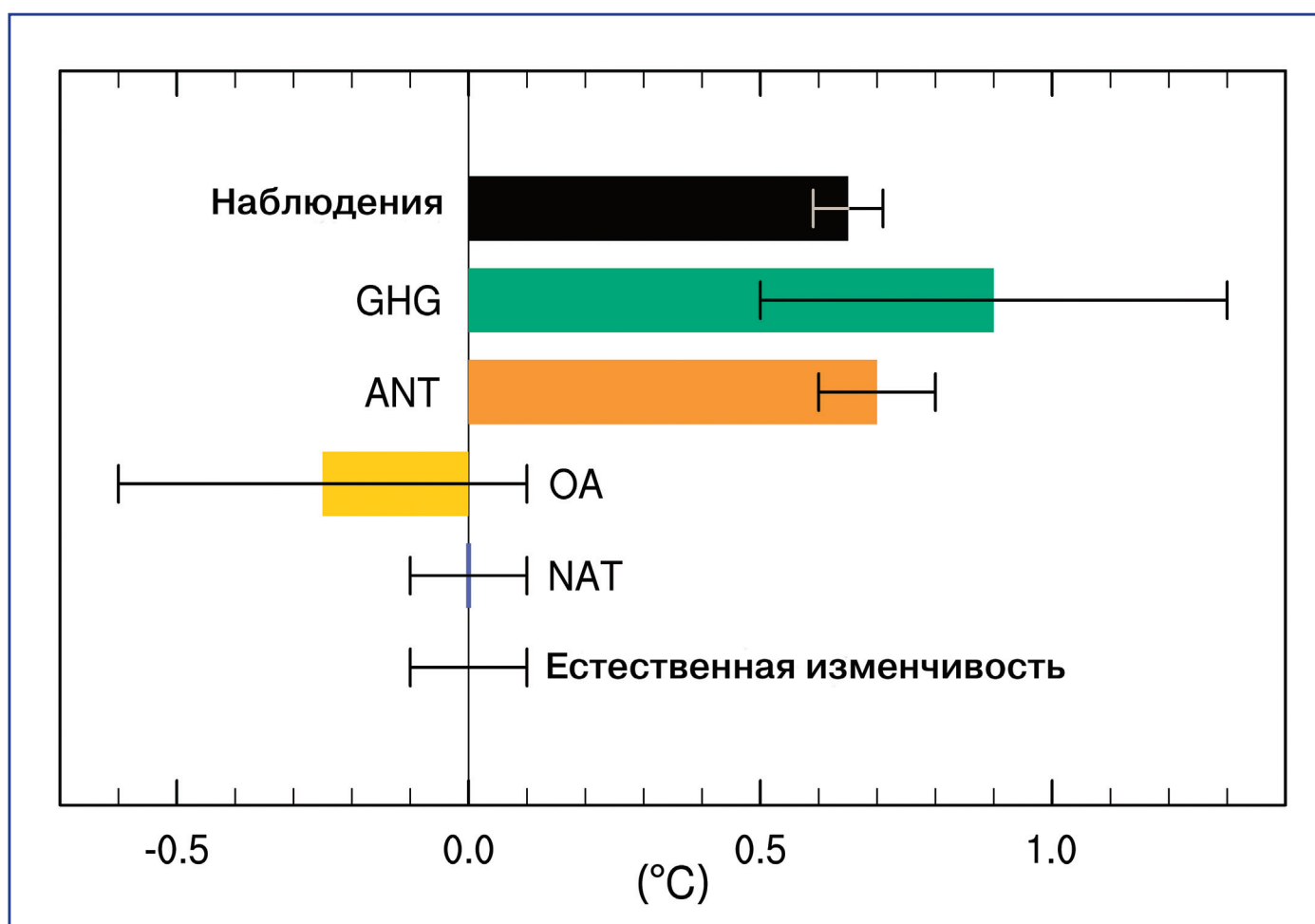


Рис. 2.2.3. Вероятностные границы (горизонтальные интервалы) и средние значения (цветные прямоугольники) оценок установленного вклада различных факторов в линейный тренд наблюдаемого потепления в 1951–2010 гг.: изменения концентраций парниковых газов (GHG), других антропогенных воздействий (OA), естественных воздействий (NAT), суммарного воздействия всех антропогенных факторов (ANT) и естественной изменчивости. Величина тренда по данным архива HadCRUT4 показана черным вместе с 5–95% доверительным интервалом для нее, учитывающим неопределенности в этом архиве (Morice et al., 2012). Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013).

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

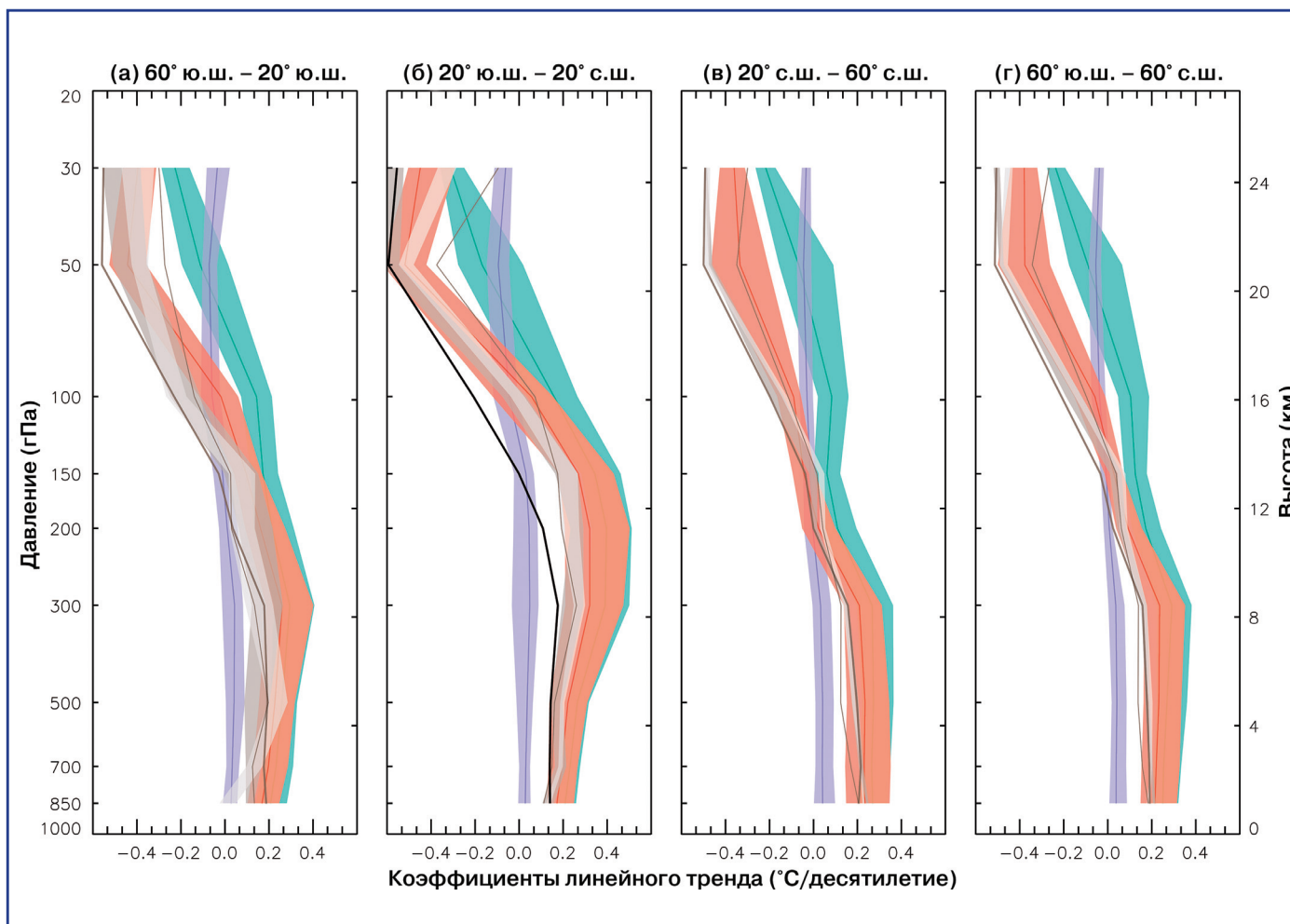


Рис. 2.2.4. Наблюдаемые и рассчитанные линейные тренды среднезональной температуры для периода 1961–2010 гг. для расчетов по моделям CMIP5 с учетом и антропогенных, и естественных внешних воздействий (красный), только естественных воздействий (синий) и только с учетом влияния парниковых газов (зеленый). Затенением соответствующего цвета выделены области между 5-ой и 95-ой перцентилями модельных распределений. Показаны также тренды по трем архивам данных радиозондовых наблюдений (жирная черная линия: HadAT2, тонкая черная линия: RAOBCORE 1.5, темно-серая полоса: RICH-obs 1.5 ансамбль, светло-серая полоса: RICH- τ 1.5 ансамбль). Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013), основанный на работе (Lott et al., 2013).

исследования, использовались разные МОЦАО и разные схемы параметризации внешних воздействий. Кроме того, отличалась и сама техника статистического анализа. Однако общие выводы, в целом, согласуются. Суммируя их, Bindoff et al. (2013) приходят к выводу, что с вероятностью большей 95% более половины наблюдаемого повышения средней глобальной приземной температуры в 1951–2010 гг. обусловлено антропогенным повышением концентраций парниковых газов и другими антропогенными воздействиями. С вероятностью большей 66% вклад парниковых газов в повышение глобальной температуры в 1951–2010 гг. находится в диапазоне от 0.5 до 1.3°C, в то время как

вклад прочих антропогенных факторов, включая охлаждающий эффект аэрозолей попадает в диапазон от -0.6 до 0.1°C . Вклад естественных факторов составляет от -0.1 до 0.1°C , а на долю внутренней изменчивости приходится от -0.1 до 0.1°C . Суммарный вклад всех рассматриваемых внешних воздействий довольно хорошо соответствуют наблюдаемому потеплению за этот период (рис. 2.2.3).

Дополнительный аргумент в пользу антропогенной природы наблюдаемого потепления дает статистический анализ связи изменений средней глобальной приземной температуры с естественными и антропогенными факторами. Так, в рабо-

2.2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

тах (Мохов, Смирнов, 2009; Мохов и др., 2012) по данным с середины XIX в. на базе анализа причинности по Грейнджеру и кроссвейвлетного анализа сделан вывод об определяющем влиянии изменений концентрации углекислого газа в атмосфере на долгопериодные тренды средней глобальной температуры, при этом естественные климатические циклы с периодами в несколько десятилетий существенно влияют только на относительно быстрые ее вариации. Влияние на долгопериодные тренды естественных факторов, связанных с солнечной и вулканической активностью, заметно менее значимо.

Важное свидетельство антропогенного влияния на климат дает анализ вертикальной структуры температурных изменений в атмосфере. В двух работах (Lott et al., 2013; Santer et al., 2013) результаты ансамблевых модельных расчетов с раздельным учетом антропогенных и естественных внешних воздействий, выполненных в рамках проекта CMIP5, сравнивались с данными наблюдений.

В работе (Lott et al., 2013) сравнение модельных результатов для периода 1961–2010 гг. производилось с данными трех архивов радиозондовых наблюдений, что позволяет оценить разброс в имеющихся данных. Наблюдаемые и рассчитанные вертикальные профили трендов среднетемпературной температуры воздуха для четырех широтных поясов показаны на рис. 2.2.4. Во всех случаях лучшее согласие с данными наблюдений показывают результаты модельного ансамбля, в котором учитывались и антропогенные, и естественные внешние воздействия. В этом ансамбле получено похолодание в стратосфере близкое к наблюдаемому и потепление в тропосфере согласующееся с наблюдаемым, но несколько его превосходящее, особенно в тропических широтах (рис. 2.2.4б). В ансамбле, в котором учитывалось только влияние изменений концентрации парниковых газов, потепление в тропосфере близко к потеплению, полученному в первом ансамбле, однако величина похолодания в стратосфере существенно меньше наблюдаемой. В ансамбле, где учитывались только естественные внешние воздействия, и потепление и похолодание выражены очень слабо и полностью расходятся с данными наблюдений.

В работе (Santer et al., 2013) результаты модельных расчетов для периода спутниковых наблюдений (1979–2012 гг.) сравнивались с данными микроволнового зондирования атмосферы по приборам MSU (Microwave Sounding Units), установленным на спутниках, причем для сравнения использовались результаты обработки этих данных, выполненные двумя группами независимых исследователей. Выводы, полученные в этой работе близки к выводам работы (Lott et al., 2013). Суммируя, можно заключить, что в последние 50 лет наблюдается необычная вертикальная структура температурных изменений в атмосфере. Ее характерными чертами являются похолодание в стратосфере и потепление в тропосфере. Модельные расчеты показывают, что похолодание в стратосфере обусловлено в основном уменьшением озонового слоя, вызванного антропогенным воздействием, и в меньшей степени увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, которое в свою очередь определило потепление тропосферы. Кроме того, расчеты показали, что такую структуру потепления крайне маловероятно получить в результате только внутренних колебаний, присущих климатической системе Земли, или в ответ на естественные внешние воздействия, включая извержения вулканов и изменения в потоке приходящей солнечной радиации. Статистический анализ позволил с высокой степенью уверенности идентифицировать антропогенный сигнал в температурных изменениях глобальной атмосферы, как по данным радиозондовых наблюдений, так и по данным спутникового зондирования атмосферы.

Мировой океан играет ключевую роль при рассмотрении изменений количества энергии, которое содержится в климатической системе Земли. По оценке (Rhein et al., 2013) на долю океана приходится 93% энергии, накопленной климатической системой за период с 1971 г. по 2010 г., который характеризуется относительно большим количеством наблюдений. Более 60% общего увеличения энергии в климатической системе приходится на верхний слой океана (0–700 м) и около 30% на более глубокие слои.

За последние несколько лет были обнаружены и уменьшены ошибки анализов данных наблюдений за температурой верхнего слоя океана, что по-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

высило достоверность оценок происходящих изменений. По оценке (Rhein et al., 2013), основанной на данных (Domingues et al., 2008), рост теплосодержания в верхнем слое океана за период 1971–2010 гг., рассчитанный на основе линейного тренда, составил около 17 (от 15 до 19) $\times 10^{22}$ Дж.

В работе (Domingues et al., 2008) было выполнено сравнение модельных расчетов изменения теплосодержания верхнего слоя океана по 7 МОЦАО проекта СМIP3 с данными откорректированного архива наблюдений. При учете в модельных экспериментах как антропогенных, так и естественных внешних воздействий модели, использованные в этой работе, показали достаточно близкие к наблюдениям результаты, как для общего тренда изменений, так и для многолетних колебаний теплосодержания верхнего слоя океана. Средний по ансамблю моделей тренд за период 1961–1999 гг. был только на 10% меньше наблюдаемого. Модельные расчеты, в которых учитывалось только антропогенное воздействие, а изменения приходившего потока солнечной радиации и влияние вулканиче-

ских извержений в расчет не принимались, значительно переоценивают общий линейный тренд и недооценивают величину многолетней изменчивости.

На рис. 2.2.5 показано воспроизведение десяти моделями проекта СМIP5 эволюции теплосодержания верхнего слоя глобального океана. Рисунок аналогичен рисунку из работы (Domingues et al., 2008), но выполнен по расчетам с моделями нового поколения. Из рисунка видно довольно хорошее, в целом, согласие с данными наблюдений модельных расчетов при учете всех внешних воздействий – и антропогенных, и естественных, хотя межмодельный разброс довольно велик. Расчеты, в которых учитываются только естественные внешние воздействия, полностью расходятся с наблюдениями.

Статистический анализ антропогенного вклада в наблюдаемые изменения температуры верхнего слоя океана на основе сравнения модельных расчетов с несколькими архивами данных наблюдений был выполнен в работах (Gleckler et al., 2012; Pierce et al., 2012). В первой работе сравне-

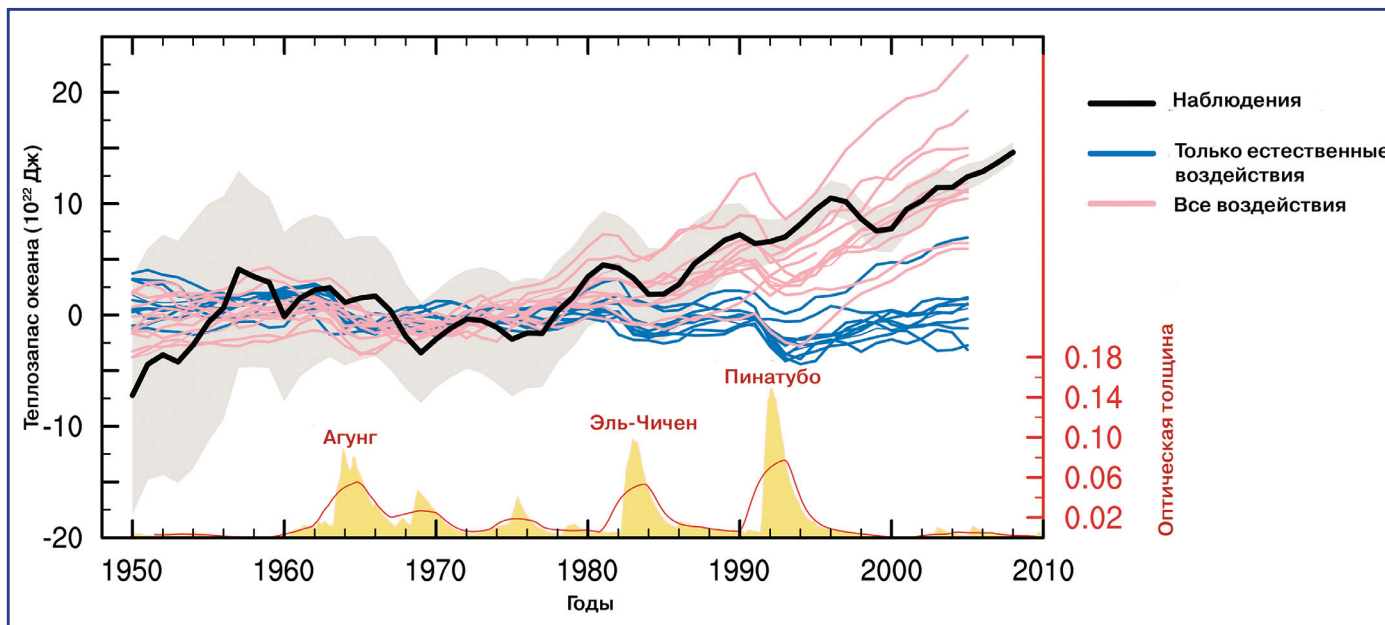


Рис. 2.2.5. Сравнение теплосапа верхних 700 м глобального океана по данным наблюдений (черная линия) и рассчитанного по десяти моделям СМIP5 с учетом только естественных внешних воздействий (синие линии), а также и антропогенных, и естественных внешних воздействий (розовые линии). Серое затенение показывает зону неопределенности в данных наблюдений. Все временные ряды рассчитаны как аномалии по отношению к теплосапу в 1961 г. Средняя глобальная величина оптической толщины стратосферного аэрозоля показана бежевым цветом в нижней части рисунка. Трехлетнее скользящее среднее для этой величины показано коричневой кривой. Указаны также названия и время извержения крупнейших вулканов. Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013), основанный на работе (Domingues et al., 2008).

2.2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

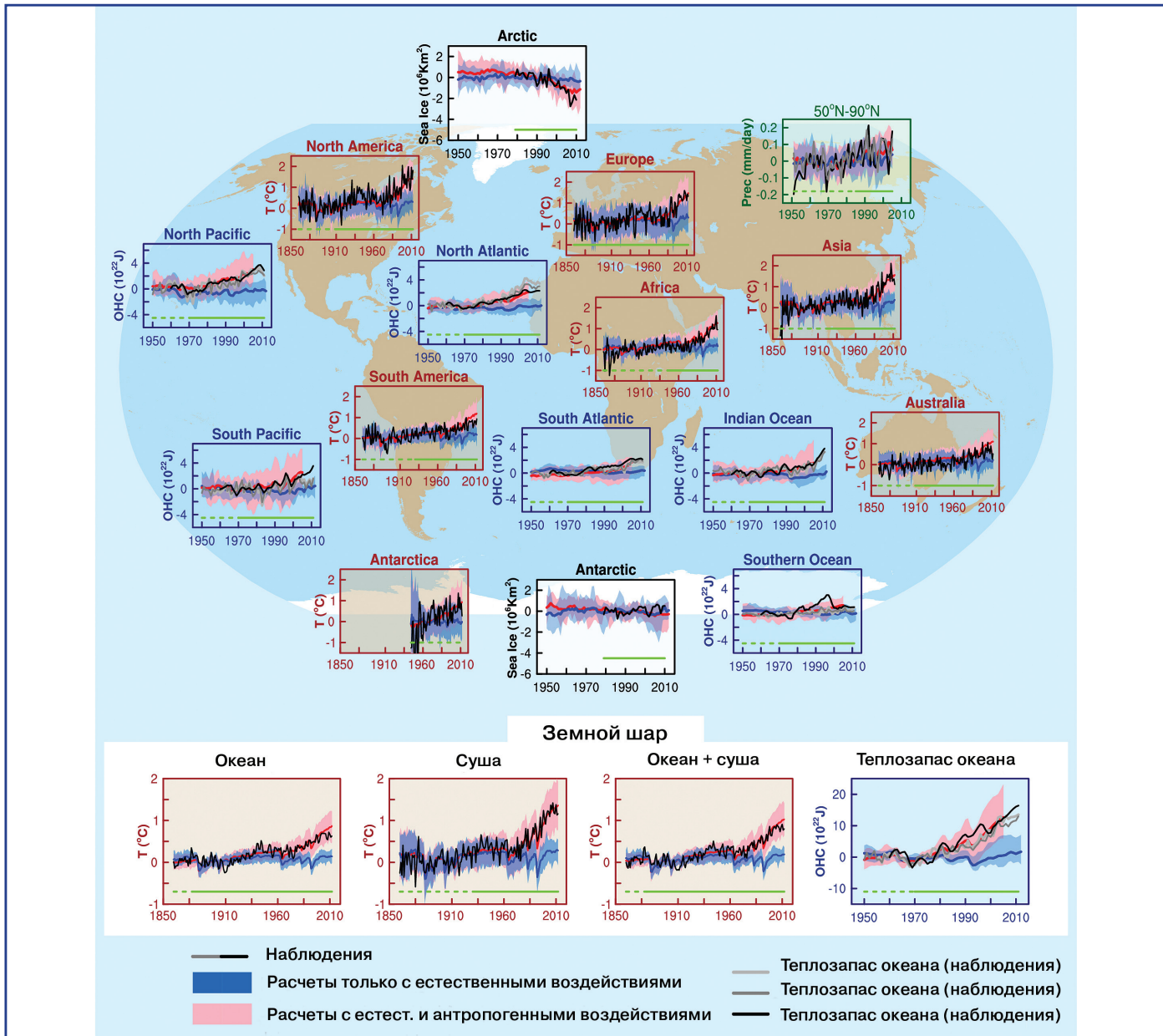


Рис. 2.2.6. Обнаружение и установление причин сигналов в элементах климатической системы Земли в региональном (верхняя часть рисунка) и глобальном (нижняя часть рисунка) масштабах. Показаны временные ряды приземной температуры (коричневый фон рисунков, обозначение: T, единица: °C), осадков (зеленый фон, обозначение: Prec, единица: мм/сут), теплозапаса океана (голубой фон, обозначение: ОНС, единица: 10^{22} Дж), концентрации морского льда (белый фон, обозначение: Sea Ice, единица: 10^6 км²). На всех рисунках данные наблюдений показаны черным цветом или черным цветом и серым затенением. Результаты модельных расчетов, учитывающих только естественные внешние воздействия, показаны синим цветом, а расчетов, учитывающих и антропогенные и естественные внешние воздействия, – розовым. Затенением соответствующего цвета выделены области между 5-ой и 95-ой перцентилями модельных распределений. Темно-синие и темно-красные линии показывают средние по модельным ансамблям. Для осадков показаны данные наблюдений из двух архивов, а для теплозапаса океана – из трех. Данные разных архивов наблюдений показаны черными или темно-серыми линиями разной цветовой интенсивности. Зеленые линии в нижней части рисунков отражают качество наблюдений и оценок. Для рядов температуры и осадков сплошные линии показывают, что при расчете площадь области, охваченной наблюдениями, составила более 50% суммарной, а пунктирные линии – менее 50%. Например, для Антарктиды, площадь области, охваченной наблюдениями, никогда не превышает 50% площади континента. На рисунках, относящихся к теплосодержанию океана и морскому льду, сплошные зеленые линии показывают, что для оценок использовались более качественные данные с хорошим охватом, а пунктирные линии – данные с лишь адекватным охватом. Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013).

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

ние производилось с расчетами по 13 моделям CMIP3, а во второй с расчетами по 20 моделям CMIP5. В обоих случаях удалось выявить антропогенный сигнал в наблюдаемых изменениях температуры. Причем, в работе (Pierce et al., 2012) на основе статистических методов оптимального обнаружения сигнала было показано, что для периода 1955–2004 гг. наблюдаемые температурные изменения не согласуются ни с предположением, что они вызваны внутренними колебаниями, присущими климатической системе, ни с предположением, что они являются следствием влияния изменений солнечной активности или извержений вулканов.

2.2.3. Совместный анализ основных климатических характеристик

Данные наблюдений, связанные с каждым элементом климатической системы, как правило, независимы, и, следовательно, совместный анализ всех наблюдений по основным компонентам климатической системы повышает уровень доверия к выводам по сравнению с одним исследованием или анализом какого-то одного компонента системы. Способность климатических моделей воспроизводить наблюдаемые изменения (с точностью до внутренней изменчивости) в широком наборе климатических характеристик также создает уверенность в качестве моделей, используемых для моделирования климата Земли.

Рисунок 2.2.6 показывает, как наблюдаемые изменения во всей климатической системе можно понять с точки зрения воздействия естественных и антропогенных факторов. На нем показаны временные ряды приземной температуры, осадков, теплозапаса океана и концентрации морского льда, полученные по данным наблюдений, а также по модельным расчетам, учитывающим и антропогенные, и естественные внешние воздействия, и по расчетам, учитывающим только естественные внешние воздействия.

Из рисунка ясно видна согласованность наблюдаемых изменений с модельными расчетами, которые включают антропогенные и естественные воздействия. Изменения температуры приземного воздуха над сушей, температуры поверхности океанов, а также изменения теплоза-

паса океана в глобальном масштабе (нижняя часть рисунка) явно демонстрируют антропогенные и природные сигналы при этом четко видно различие между наблюдаемыми изменениями и модельными расчетами, основанными на гипотезе только естественных внешних воздействий на климатическую систему. Эти сигналы не просто появляются в глобальных средних, но и повторяются в масштабах континентов и отдельных океанических бассейнов (верхняя часть рисунка). Изменения морского льда в Арктике существенно выходят за границы ожидаемого диапазона, определяемого естественной изменчивостью. Однако в Антарктике концентрация морского льда остается в целом в пределах естественной изменчивости, что согласуется с модельными экспериментами, учитывающими все внешние воздействия.

Таким образом, можно констатировать, что наблюдается одновременное увеличение запаса энергии всех основных компонент климатической системы Земли. Причем амплитуда и пространственная структура наблюдаемого потепления в различных компонентах хорошо согласуются с ожидаемым по модельным расчетам откликом климатической системы Земли на антропогенные и естественные внешние воздействия.

2.2.4. Литература

Мохов И. И., Смирнов Д. А., 2009. Эмпирические оценки воздействия естественных и антропогенных факторов на глобальную приповерхностную температуру, Доклады АН, т. 426, № 5, с. 679–684.

Мохов И. И., Смирнов Д. А., Карпенко А. А., 2012. Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений, Доклады АН, т. 443, № 2, с. 225–231.

Спорышев П. В., Мирвис В. М., Катцов В. М., Мелешко В. П., Ранькова Э. Я., 2008. Антропогенный вклад в изменение климата. В кн.: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата. М., Росгидромет. с. 152–173.

2.2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

- Bindoff N. L., Stott P. A., AchutaRao K. M., Allen M. R., Gillett N., Gutzler D., Hansingo K., Hegerl G., Hu Y., Jain S., Mokhov I. I., Overland J., Perlwitz J., Sebbari R., Zhang X., 2013.** Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 867–952.
- Boer G. J., 2011.** The ratio of land to ocean temperature change under global warming, *Climate Dynamics*, vol. 37, pp. 2253–2270.
- Domingues C., Church J., White N., Gleckler P., Wijffels S., Barker P., Dunn J., 2008.** Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise, *Nature*, vol. 453, pp. 1090–1093.
- Gleckler P. J., Santer B. D., Domingues C. M., Pierce D. W., Barnett T. P., Church J. A., Taylor K. E., AchutaRao K. M., Boyer T. P., Ishii M., Caldwell P. M., 2012.** Human-induced global ocean warming on multidecadal timescales, *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 524–529.
- Jones G. S., Stott P. A., Christidis N., 2013.** Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 1–24, doi:10.1002/jgrd.50239.
- Lott F. C., Stott P. A., Mitchell D. M., Christidis N., Gillett N. P., Haimberger L., Perlwitz J., Thorne P. W., 2013.** Models versus radiosondes in the free atmosphere: A new detection and attribution analysis of temperature, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 2609–2619, doi:10.1002/jgrd.50255.
- Morice C. P., Kennedy J. J., Rayner N. A., Jones P. D., 2012.** Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set, *J. Geophys. Res.*, vol. 117, D08101, doi:10.1029/2011JD017187.
- Pierce D. W., Gleckler P. J., Barnett T. P., Santer B. D., Durack P. J., 2012.** The fingerprint of human-induced changes in the ocean's salinity and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L21704, doi:10.1029/2012GL053389.
- Rhein M., Rintoul S. R., Aoki S., Campos E., Chambers D., Feely R. A., Gulev S., Johnson G.C., Josey S.A., Kostianoy A., Mauritzen C., Roemmich D., Talley L.D., Wang F., 2013.** Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 255–315.
- Santer B. D., Painter J. F., Bonfils C., Mears C. A., Solomon S., Wigley T. M. L., Gleckler P. J., Schmidt G. A., Doutriaux C., Gillett N. P., Taylor K. E., Thorne P. W., Wentz F. J., 2013.** Human and natural influences on the changing thermal structure of the atmosphere, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, no. 43, pp. 17235–17240.
- Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Alexander L. V., Allen S. K., Bindoff N. L., Breon F.-M., Church J. A., Cubasch U., Emori S., Forster P., Friedlingstein P., Gillett N., Gregory J. M., Hartmann D. L., Jansen E., Kirtman B., Knutti R., Krishna Kumar K., Lemke P., Marotzke J., Masson-Delmotte V., Meehl G.A., Mokhov I. I., Piao S., Ramaswamy V., Randall D., Rhein M., Rojas M., Sabine C., Shindell D., Talley L. D., Vaughan D. G., Xie S.-P., 2013.** Technical Summary. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–115.

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Глава 2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

П.В. Спорышев

В.М. Мирвис

2.3.1. Введение

В настоящей главе рассматривается эволюция климата России в целом в XX – начале XXI века по данным наблюдений, а также в расчетах, выполненных по современным глобальным климатическим моделям с учетом влияния всех внешних воздействий и с учетом только естественных внешних воздействий. Дается статистическая оценка вклада отдельных внешних воздействий в климатические изменения на территории России. Рассматривается вся территория России в целом и Россия как часть более крупных регионов.

Анализируются региональные аспекты установления причин климатических изменений и оценки степени влияния отдельных внешних воздействий на климат. Обсуждаются проблемы соответствия модельных расчетов данным наблюдений для разных сезонов и разных регионов применительно к территории России. Рассматриваются вопросы статистической интерпретации результатов ансамблевых модельных расчетов. Даются статистические оценки вклада отдельных внешних воздействий в региональные климатические изменения на территории России.

Обсуждаются вопросы обнаружения влияния внешних воздействий на климат России при рассмотрении отдельных аномальных климатических явлений, используемые в таких исследованиях статистические методы. Анализируются полученные результаты и обсуждаются нерешенные проблемы.

2.3.2. Изменения климата России в модельных расчетах с отдельным учетом влияния антропогенных и естественных внешних воздействий

2.3.2.1. Используемые данные наблюдений и модельных экспериментов

Материал пункта 2.3.2 в основном основан на работе (Спорышев, Говоркова, 2013). В этой ра-

боте используются два архива данных наблюдений за температурой приземного воздуха: архив University of Delaware Terrestrial Air Temperature V2.01 (далее по тексту – UD) и архив CRUTEM3v (далее по тексту – CRU). Важно отметить, что при осреднении по достаточно большим регионам оба архива дают близкие результаты.

Модельные расчеты представлены тремя ансамблями экспериментов с МОЦАО, участвовавшими в проекте CMIP5. В рамках проекта CMIP5 выполнялись специальные эксперименты по моделированию эволюции климата XIX–XXI веков (1850–2005 гг.) с учетом всех внешних воздействий как естественной, так и антропогенной природы. К антропогенным внешним воздействиям, в частности, относятся наблюдаемые изменения концентраций в атмосфере основных парниковых газов и аэрозолей антропогенного происхождения, а также изменения землепользования, а к естественным воздействиям – изменения в структуре приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы и изменения концентраций аэрозолей естественного происхождения, например, связанные с извержениями крупных вулканов. Эти эксперименты в проекте CMIP5 называются Historical. Для ансамбля таких экспериментов используется обозначение Hist. Кроме того, с рядом МОЦАО были выполнены специальные эксперименты, предназначенные для установления причин наблюдаемых климатических изменений, в которых влияние внешних воздействий учитывалось отдельно. Сформировано два ансамбля таких экспериментов: в первом ансамбле все внешние воздействия были фиксированы, кроме изменений в концентрации основных парниковых газов (ансамбль Hist-GHG), а во втором ансамбле учитывались только внешние воздействия естественной природы (ансамбль Hist-Nat). В таблице 3.1.1 приводятся характеристики 17 МОЦАО, эксперименты с которыми рассматриваются. В таблице также указано проводились ли с данной моделью эксперименты с отдельным учетом влияния внешних воздействий. Таким образом, ансамбль Hist составляют 17 экспериментов с 17 МОЦАО (по одному эксперименту с ка-

2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

ждой моделью), а ансамбли Hist-GHG и Hist-Nat состоят из 9 экспериментов с 9 МОЦАО.

Использованные модели отличались как пространственным разрешением, так и схемами параметризации физических процессов, что в расчетах выразилось в разной чувствительности моделей к внешним воздействиям, а также в разной скорости поглощения тепла Мировым океаном. Кроме того, внешние воздействия отличались между экспериментами с разными моделями за счет того, что не все модели принимали во внимание полный набор внешних воздействий, а также за счет того, что использовались разные алгоритмы расчета их влияния на атмосферную циркуляцию. Несмотря на эти неопределенности, существуют явные различия между модельными ансамблями, и анализ этих различий служит основой для понимания причин наблюдаемых климатических изменений.

2.3.2.2. Временной ход температурных изменений

Даже при полном учете всех внешних воздействий нельзя ожидать, что модели будут способны воспроизвести межгодовые колебания температуры, поскольку значительный вклад в эти колебания вносит естественная изменчивость присутствующая климатической системе Земли, которая воспроизводится в модельных расчетах только статистически. Учесть влияние естественной изменчивости, связанной с долгопериодными колебаниями в системе взаимодействия океан–атмосфера, можно в экспериментах с заданным по данным наблюдений начальным состоянием Мирового океана, которые не рассматриваются в настоящей работе. В рассматриваемых модельных расчетах источником близости модельных и наблюдаемых изменений является влияние внешних воздействий, которое проявляется как в масштабах десятилетий (например, влияние изменений в газовом составе атмосферы), так и в годовых масштабах (например, влияние аэрозолей антропогенного и естественного происхождения).

На рис. 2.3.1 представлен временной ход среднегодовой температуры приземного воздуха в среднем по всей территории России по данным наблюдений и по трем модельным ансамблям. На

рисунке показаны две кривые наблюдений, соответствующие двум архивам данных UD и CRU. Различие между ними очень мало, и в дальнейшем, при вычислении различных статистических характеристик соответствия наблюдаемых и модельных данных будет использоваться только один архив UD.

Визуально лучшее всего модельные расчеты с данными наблюдений согласуются в ансамбле Hist. Основные температурные изменения на территории России начинают происходить с середины 20-го века. В ансамбле Hist-GHG повышение температуры в последние десятилетия превышает наблюдаемые значения, а в ансамбле Hist-Nat повышение температуры отсутствует.

При статистическом анализе соответствия модельных расчетов данным наблюдений основное внимание уделялось периоду 1950–2005 гг., поскольку именно в этот период влияние внешних воздействий проявляется достаточно явно, кроме того, для этого периода имеется наиболее полная база данных наблюдений.

Для количественной оценки соответствия наблюдаемых и модельных межгодовых колебаний температуры были рассчитаны среднеквадратические отклонения ежегодных значений температуры от среднего для периода 1950–2005 гг. По данным наблюдений эта величина составляет 0.75°C . В экспериментах Hist она различается между экспериментами и колеблется от 0.57°C до 0.91°C , а в среднем по всем экспериментам равна 0.74°C , что, практически, точно соответствует наблюдениям. В среднем по ансамблю Hist-GHG среднеквадратические отклонения составили 0.83°C , а по ансамблю Hist-Nat – 0.61°C . Таким образом, значение среднеквадратического отклонения в ансамбле Hist-GHG больше, а в ансамбле Hist-Nat меньше, чем по данным наблюдений, что, очевидно, связано со значительным повышением температуры в рассматриваемый период в первом ансамбле и его отсутствием во втором.

Для того чтобы оценить, какая часть межгодовой изменчивости может быть воспроизведена в модельных расчетах, были рассчитаны коэффициенты корреляции наблюдаемой и модельных температур. Для среднегодовой температуры они представлены на рис. 2.3.2. Из анализа рис. 2.3.1 можно заключить, что существенный вклад в вы-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

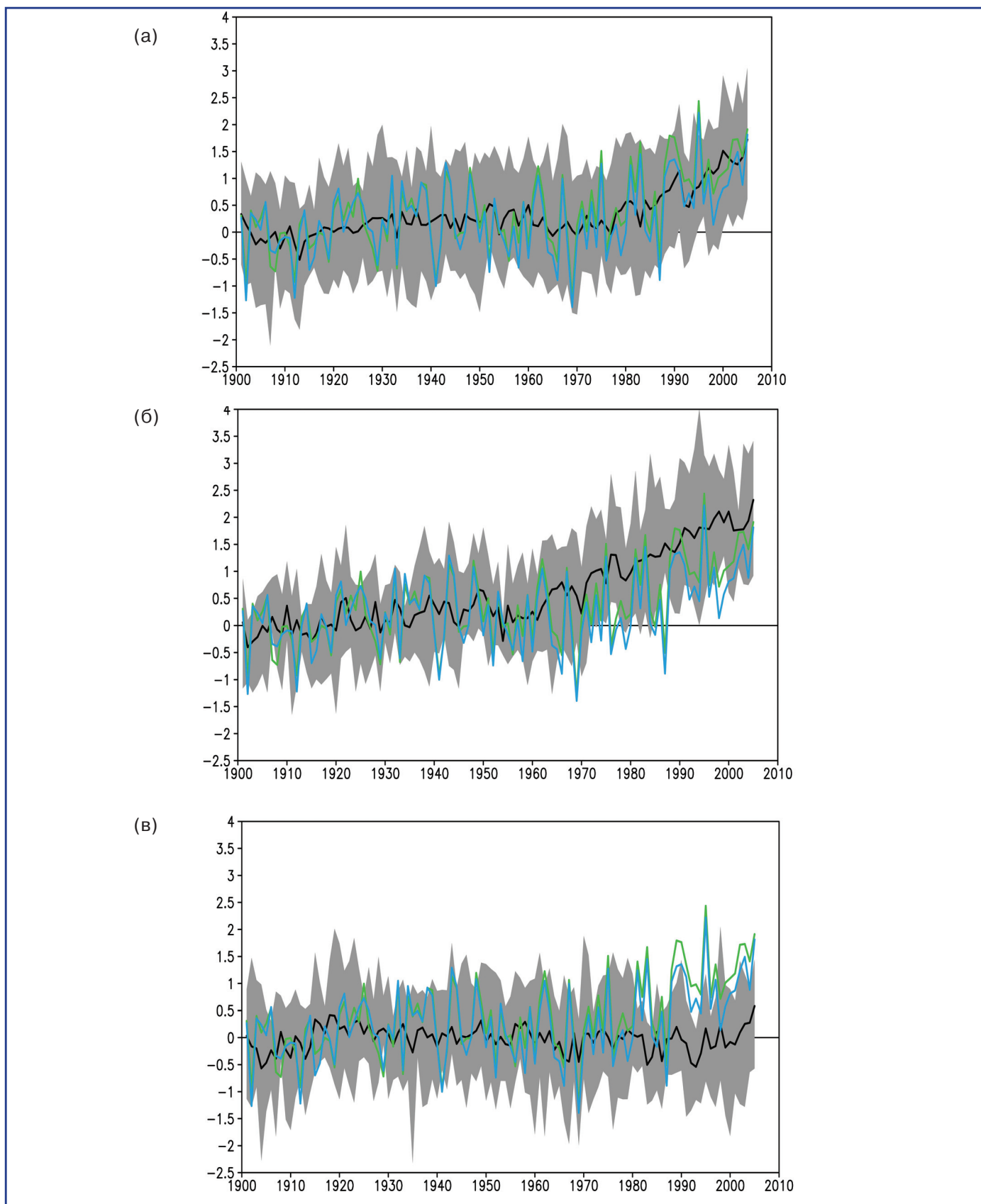


Рис. 2.3.1. Аномалии среднегодовой температуры приземного воздуха на территории России по данным наблюдений (зеленая (CRU) и синяя (UD) кривые) и в среднем по ансамблям Hist (а), Hist-GHG (б) и Hist-Nat (в) (черные кривые). Аномалии рассчитаны по отношению к базовому периоду 1901–1930 гг. Серым цветом выделен диапазон разброса оценок по модельным ансамблям.

2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

сокие значения корреляций должно вносить присутствие в данных тренда, который в первом приближении можно рассматривать как линейный. В связи с этим для сравнения справа рис. 2.3.2 приведены аналогичные коэффициенты корреляции, полученные после удаления линейного тренда из временных рядов.

Рассмотрим подробнее результаты для ансамбля Hist (рис. 2.3.2а, 2.3.2б). Коэффициенты корреляции сильно различаются между экспериментами и для некоторых моделей статистически незначимы на уровне 5%. Разброс составляет от 0.11 до 0.57. Ансамблевое осреднение позволяет ослабить влияние естественного шума и усилить сигнал, связанный с внешними воздействиями. Корреляция ансамблевого среднего с данными наблюдений статистически значима и равна 0.54.

Для количественной оценки влияния одной переменной на другую часто используется коэффициент детерминации. Он показывает, какая доля дисперсии первой переменной может быть объяснена с помощью линейной регрессионной модели, в которой предиктором является вторая переменная. В рассматриваемом случае коэффициент детерминации составляет 0.29, и, таким образом, 29% дисперсии межгодовых температурных изменений воспроизводится в ансамбле Hist. После удаления линейного тренда из временных рядов корреляции падают, а для двух моделей становятся даже отрицательными. Коэффициент корреляции с ансамблевым средним также падает до 0.23 и становится статистически незначимым. Однако довольно большая величина этого коэффициента говорит о том, что влияние внешних воздействий на изменения температуры в регионе не является линейным.

В ансамбле Hist-GHG (рис. 2.3.2в, 2.3.2г) во всех экспериментах корреляции статистически значимы, а для ансамблевого среднего коэффициент корреляции равен 0.49. Однако связь с данными наблюдений в этом ансамбле держится только на трендовой составляющей. Удаление линейного тренда для большинства моделей, практически, обнуляет корреляции, а коэффициент корреляции с ансамблевым средним становится отрицательным. В ансамбле Hist-Nat (рис. 2.3.2д, 2.3.2е) все корреляции малы, а коэффициент корреляции с ансамблевым средним равен 0.18. Удаление ли-

нейного тренда слабо сказывается на величинах коэффициента корреляции.

На территории России влияние внешних воздействий на временную эволюцию температуры происходит на фоне значительной естественной изменчивости, что затрудняет выделение сигнала, связанного с внешними воздействиями. В связи с этим представляется интересным обратить особое внимание на летний сезон, когда влияние естественной изменчивости минимально.

На рис. 2.3.3 представлены коэффициенты корреляции температуры приземного воздуха по данным наблюдений и модельных расчетов для лета. Картина статистических связей в этом случае отличается от представленной на рис. 2.3.2. В ансамбле Hist в 15 экспериментах из 17 коэффициенты корреляции статистически значимы. Коэффициент корреляции со средним по ансамблю составляет 0.6, и он заметно больше чем для среднегодовой температуры. Таким образом, 36% дисперсии межгодовых изменений температуры воспроизводится в ансамбле. Удаление линейного тренда из временных рядов в большинстве экспериментов слабее влияет на корреляцию. Коэффициент корреляции со средним по ансамблю остается статистически значимым и довольно большим (0.51).

В ансамбле Hist-GHG корреляции заметно слабее, и в трех экспериментах коэффициенты корреляции статистически незначимы. Для ансамблевого среднего коэффициент корреляции равен 0.33. Так же, как и в случае среднегодовой температуры, удаление линейного тренда разрушает статистические связи. В ансамбле Hist-Nat коэффициенты корреляции, в целом, больше, а коэффициент корреляции с ансамблевым средним равен 0.27 и статистически значим. Удаление линейного тренда слабо сказывается на значениях коэффициента корреляции.

Таким образом, можно заключить, что основной вклад в наблюдаемое повышение температуры на территории России вносит влияние изменений в концентрации парниковых газов. Однако и естественные внешние воздействия значимо проявляются в межгодовых колебаниях температуры. Эти воздействия особенно хорошо различимы летом, когда влияние аэрозолей на поток поступающей на поверхность солнечной радиации дости-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

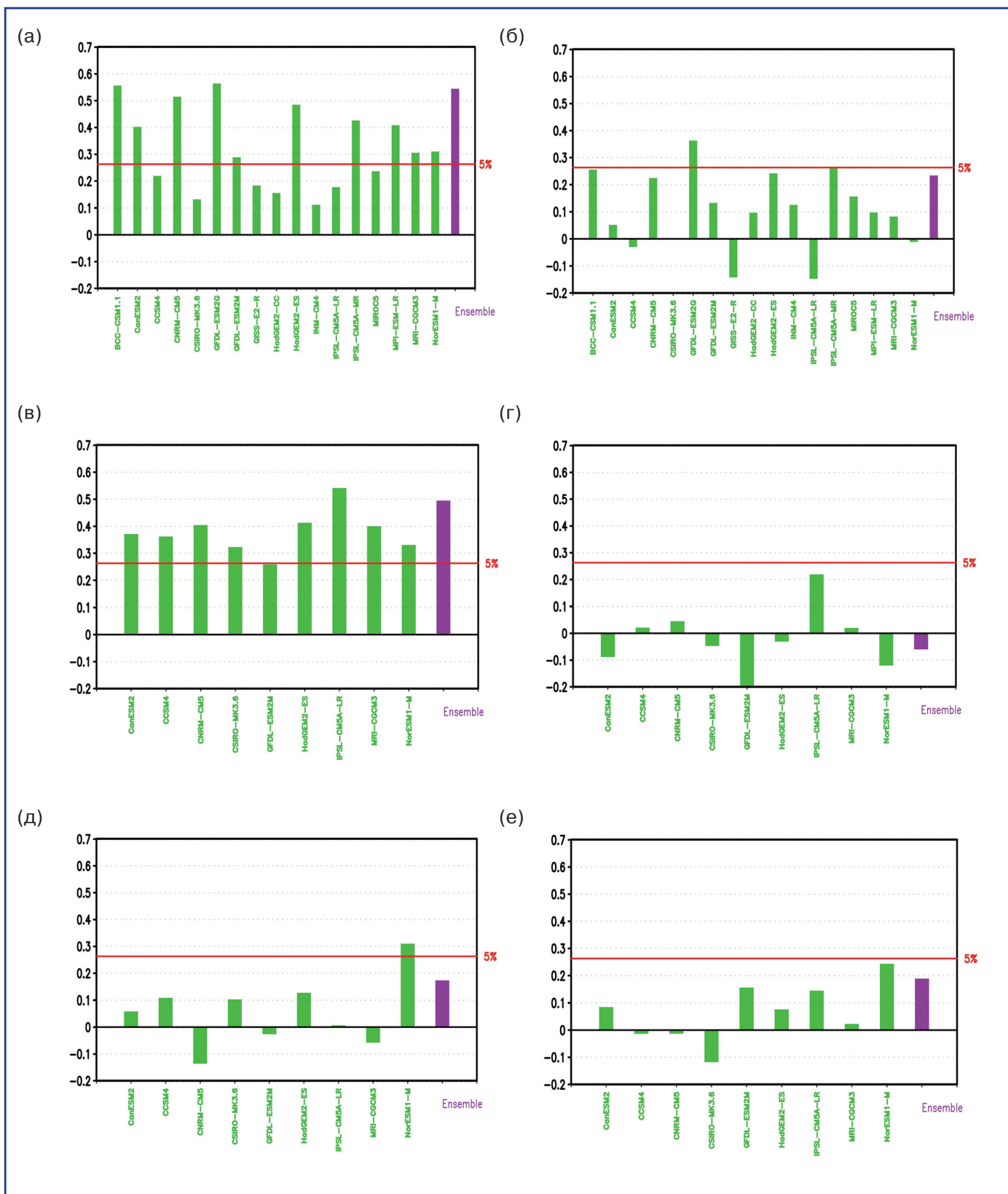


Рис. 2.3.2. Коэффициенты корреляции наблюдаемой (UD) и модельных среднегодовой температуры приземного воздуха в среднем по территории России для периода 1950–2005 гг. для экспериментов из ансамблей Hist (а), Hist-GHG (в) и Hist-Nat (д) и то же после удаления линейного тренда из временных рядов для ансамблей Hist (б), Hist-GHG (г) и Hist-Nat (е). Под каждым столбцом указана соответствующая МОЦАО. Последний столбик соответствует корреляции с ансамблевым средним. Красная прямая показывает 5%-й уровень значимости для коэффициентов корреляции.

2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

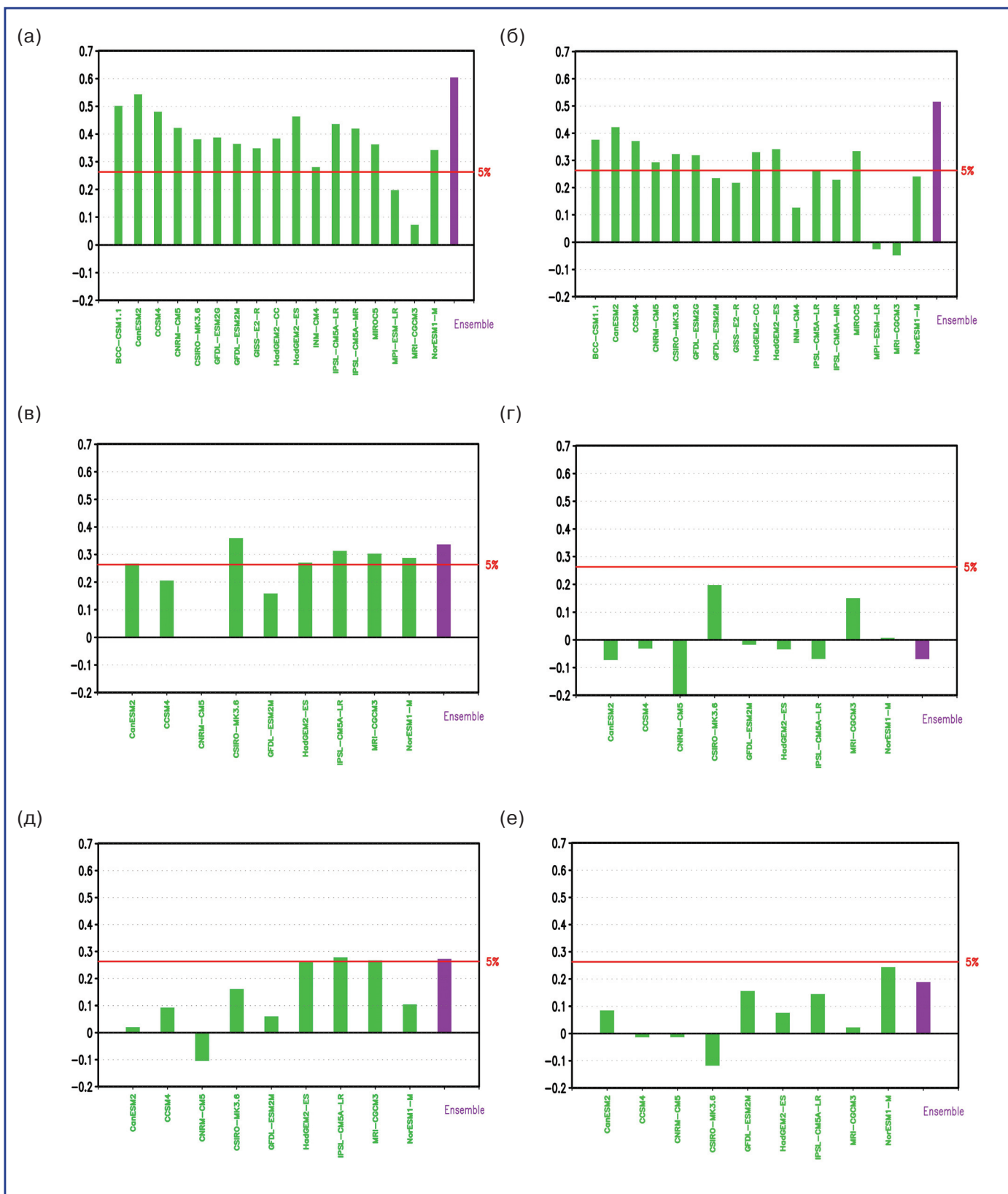


Рис. 2.3.3. Коэффициенты корреляции температуры приземного воздуха в среднем по территории России в летний сезон для периода 1950–2005 гг. по данным наблюдений (UD) и модельных расчетов для экспериментов из ансамблей Hist (а), Hist-GHG (в) и Hist-Nat (д) и то же после удаления линейного тренда из временных рядов для ансамблей Hist (б), Hist-GHG (г) и Hist-Nat (е). Под каждым столбиком указана соответствующая МОЦАО. Последний столбик соответствует корреляции с ансамблевым средним. Красная прямая показывает 5%-й уровень значимости для коэффициентов корреляции.

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

гает годового максимума, а собственная (не связанная с внешними воздействиями) межгодовая изменчивость температуры сравнительно мала.

Аналогичный анализ модельного воспроизведения временного хода температурных изменений был выполнен и для ряда крупных регионов России. Выводы, в целом, согласуются. Существенную часть дисперсии межгодовых изменений (от 20% до 40%) удастся воспроизвести в ансамбле Hist, в двух других ансамблях соответствие с наблюдениями заметно хуже. По сезонам максимальные значения коэффициентов корреляции получаются летом на фоне меньшей собственной изменчивости.

2.3.2.3. Пространственное соответствие расчетных и наблюдаемых изменений

В работе (Спорышев, Говоркова, 2013) для проведения анализа пространственного соответствия было выбрано два климатических временных интервала: “контрольный климат” (1951–1980 гг.) и “изменившийся климат” (1991–2005 гг.). Сравнение наблюдаемых и средних по модельному ансамблю изменений на территории России показывает их существенное расхождение. Это расхождение особенно заметно при сравнении не среднегодовых, а сезонных изменений. На рис. 2.3.4 показаны изменения температуры приземного воздуха на территории России зимой для изменившегося климата по отношению к контрольному. В целом, изменения, наиболее близкие по средней величине потепления к наблюдаемым, получены в ансамбле Hist (рис. 2.3.4б). В ансамбле Hist-GHG (рис. 2.3.4в) потепление заметно больше наблюдаемого, а в ансамбле Hist-Nat (рис. 2.3.4г) потепление отсутствует.

Однако, хотя и наблюдаемые изменения (рис. 2.3.4а) и средние по ансамблю Hist показывают близкое потепление в среднем по территории России, при их детальном сравнении видны существенные различия. В модельных расчетах присутствует слабо выраженное полярное усиление потепления, тогда как по данным наблюдений наиболее сильное потепление происходит южнее в средних широтах. В целом, поле модельных изменений гораздо более однородно, чем наблюдаемых, и в нем практически нет областей сильно

выраженного потепления, а областей похолодания нет совсем. В то же время, по данным наблюдений на территории России есть как области особенно сильного потепления (например, европейская территория России или юг центральной Сибири), так и похолодания (например, крайний северо-восток России). Причина таких различий может быть связана как с неадекватностью модельного воспроизведения климатических изменений, так и с тем, что эволюция климатической системы может быть, в принципе, получена в модельных расчетах только в вероятностной форме (Катцов и др., 2008).

Как отмечено в работе (Спорышев и др., 2012), даже при использовании “идеальной” климатической модели, если бы существование такой модели было возможно, нелинейность и стохастичность, присущие климатической системе, а также неполнота информации о ее начальном состоянии и внешних воздействиях на нее, не позволяют рассчитывать на то, что в расчетах будут получены климатические изменения точно соответствующие наблюдаемым. Две модельные реализации эволюции климатической системы, отличающиеся только начальными условиями, неизбежно будут существенно расходиться. А среднее по модельному ансамблю не будет точно совпадать ни с какой-то одной реализацией, ни с данными наблюдений. Поэтому при анализе пространственного соответствия модельных расчетов данным наблюдений следует ориентироваться не на различия между наблюдениями и ансамблевым средним, а на попадание наблюдаемых изменений в прогнозируемые статистические интервалы, полученные по модельному ансамблю.

В работе (Спорышев, Говоркова, 2013) использовалось дальнейшее развитие вероятностного подхода, предложенного в работе (Спорышев и др., 2012). При этом подходе предполагается, что каждый член модельного ансамбля является равноправным и взаимозаменяемым с любым другим членом ансамбля и с реальной наблюдаемой эволюцией климатической системы. Все данные наблюдений и модельных расчетов были переведены в единую регулярную сетку разрешения $5^\circ \times 5^\circ$. В каждой ячейке сетки, расположенной на континентах, анализировались аномалии средней температуры приземного воздуха для изменивше-

2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

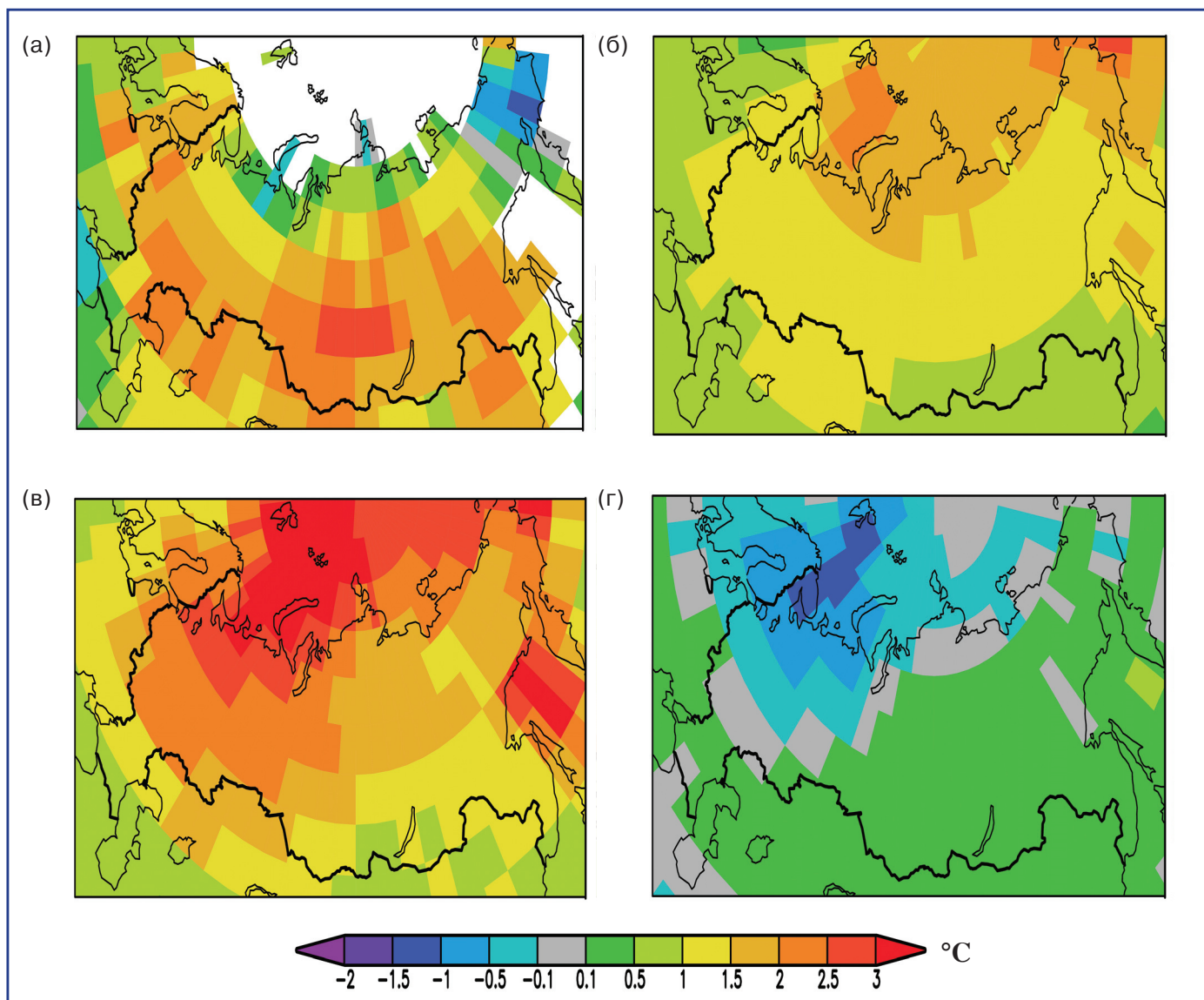


Рис. 2.3.4. Изменения температуры приземного воздуха на территории России зимой для «изменившегося климата» (1991–2005 гг.) по отношению к «контрольному климату» (1951–1980 гг.) по данным наблюдений UD (а) и в среднем по трем модельным ансамблям: Hist (б), Hist-GHG (в) и Hist-Nat (г).

гося климата по отношению к контрольному. Отметим, что рассматривались все континенты, за исключением Антарктиды, для которой данных наблюдений недостаточно для проведения такого анализа. Для всех трех рассматриваемых модельных ансамблей были построены 90%-е «интервалы предсказания» для возможных климатических изменений, и проверялось, попадают ли наблюдаемые изменения в эти интервалы. Интервалы предсказания являются для случайных величин аналогом обычных доверительных интервалов, которые по определению строятся только для детерминированных величин. Если задан уровень уверенности α , то при многократной реализации

используемой вероятностной модели случайная величина будет с вероятностью α попадать в построенный для нее $(100 \cdot \alpha)\%$ -ный интервал предсказания. Таким образом, если с вероятностной точки зрения наблюдения можно рассматривать как еще один член модельного ансамбля, то примерно в 90% случаев наблюдаемые изменения будут попадать в 90%-е интервалы предсказания, построенные по этому ансамблю. И процент точек, в которых наблюдаемые изменения попадают в модельные интервалы, представляет собой численную характеристику соответствия наблюдаемых и модельных изменений. Ячейки регулярной сетки имеют разную площадь, зависящую от гео-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

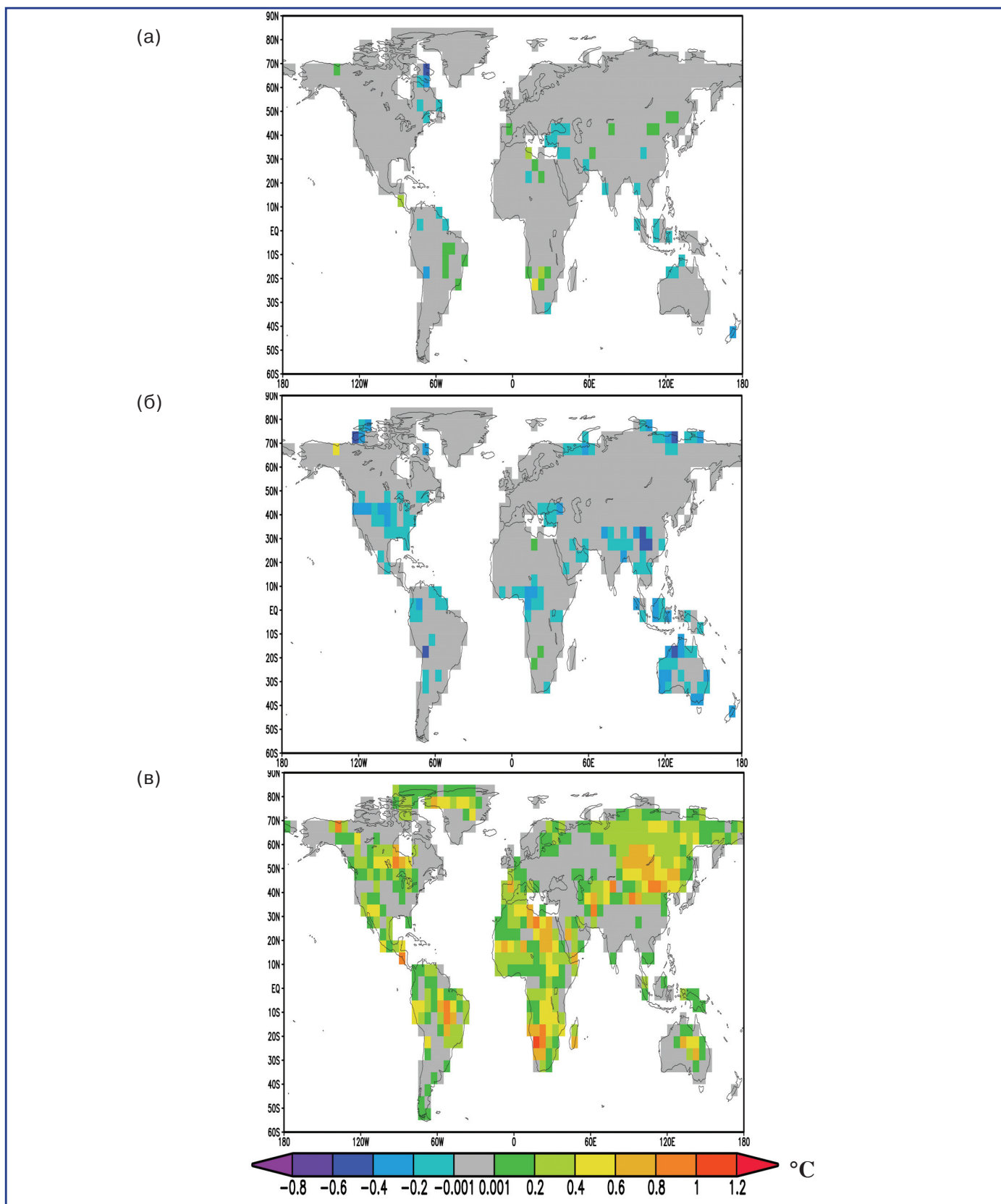


Рис. 2.3.5. Области, в которых наблюдаемые изменения среднегодовой температуры приземного воздуха для «изменившегося климата» (1991–2005 гг.) по отношению к «контрольному климату» (1951–1980 гг.) не отклоняются значимо на уровне 10% от ансамблевого среднего (серый тон), а также области, где эти отклонения значимы для модельных ансамблей Hist (а), Hist-GHG (б) и Hist-Nat (в). В случае значимых отклонений указано, насколько наблюдаемые изменения выходят за границы 90%-ных интервалов предсказания.

2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Таблица 2.3.1. Доля (%) площади регионов, на которой наблюдаемые изменения температуры приземного воздуха для периода 1991–2005 гг по отношению к периоду 1951–1980 гг. попадают в 90%-е интервалы предсказания для них

Регион	Год, сезон	Модельный ансамбль		
		Hist	Hist-GHG	Hist-Nat
Все континенты (кроме Антарктиды)	Год	91.5%	77.8%	35.7%
	Зима	91.0%	79.3%	56.6%
	Лето	89.4%	78.9%	51.9%
Вся территория России	Год	98.8%	93.3%	26.9%
	Зима	90.0%	80.0%	66.1%
	Лето	99.6%	98.2%	79.1%

графической широты ячейки. И как обычно в метеорологии, естественнее говорить не о проценте точек, а о соответствующей доле площади, что, по сути, не меняет проведенных рассуждений. Проверка попадания наблюдаемого изменения в модельный интервал предсказания эквивалентна статистическому тесту по оценке значимости отклонения наблюдаемого изменения от ансамблевого среднего. Попадание в 90%-й интервал означает, что отклонение от ансамблевого среднего не значимо на уровне 10%.

Результаты статистического анализа показали, что температурные изменения, полученные в ансамбле Hist, хорошо соответствуют наблюдаемым изменениям. Так, для всей территории континентов проценты площади ячеек, в которых наблюдаемые изменения попадают в модельные интервалы, для года, зимы и лета Северного полушария (СП) при ожидаемых 90% составили, соответственно, 91.5%, 91.0% и 89.4% (таблица 2.3.1). В ансамбле Hist-GHG указанные доли равны, соответственно, 77.8%, 79.3% и 78.9%, а в ансамбле Hist-Nat – 35.7%, 56.6% и 51.9%. Проверка статистической значимости полученных отличий показала, что для ансамбля Hist рассматриваемые отличия не значимы на уровне 5%, а для двух других ансамблей значимы.

Дополнительную информацию о соответствии наблюдаемых изменений расчетным можно получить из рисунка 2.3.5, где для среднегодовой температуры приземного воздуха для трех модельных ансамблей показаны области, в которых наблюдаемые изменения температуры не отклоняются значимо на уровне 10% от ансамблевого среднего (окрашены серым цветом), а также обла-

сти, где эти отклонения значимы. Причем, в случае значимых отклонений указано, насколько наблюдаемые изменения выходят за границы 90%-х интервалов предсказания. Из рисунка видно, что для ансамбля Hist число точек, в которых наблюдаемые изменения значимо больше или меньше расчетных, примерно, равно (рис. 2.3.5а). Для двух других ансамблей это не так. Для ансамбля Hist-GHG наблюдаемые изменения в подавляющем большинстве случаев оказываются меньше расчетных, а для ансамбля Hist-Nat – больше. Таким образом, наблюдаемые температурные изменения хорошо соответствуют модельным расчетам, учитывающим все внешние воздействия, и не могут быть объяснены ни только естественными воздействиями, ни только влиянием роста атмосферной концентрации парниковых газов.

Климатические изменения как наблюдаемые, так модельные схожи в географически близких регионах, что статистически проявляется в уменьшении числа степеней свободы в используемой нами вероятностной модели. Разнообразие климатических изменений на территории России сравнительно невелико, и при отдельном рассмотрении России число степеней свободы оказывается недостаточным для получения статистически точного соответствия. Однако и в этом случае было получено очевидное расхождение результатов расчетов из ансамбля Hist-Nat с данными наблюдений. Так, для среднегодовой температуры доля площади ячеек, в которых наблюдаемые изменения попадают в модельные интервалы, составили для ансамблей Hist, Hist-GHG и Hist-Nat 98.8%, 93.3% и 26.9% соответственно (табл. 2.3.1).

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Таблица 2.3.2. Изменения температуры приземного воздуха (°C) для периода 1991–2005 гг по отношению к 1951–1980 гг

Регион	Год, сезон	Данные наблюдений	Модельный ансамбль		
			Hist	Hist-GHG	Hist-Nat
Все континенты (кроме Антарктиды)	Год	0.60	0.62 (0.28; 0.96)	0.89 (0.48; 1.30)	-0.01 (-0.29; 0.28)*
	Зима	0.70	0.68 (0.28; 1.07)	0.99 (0.57; 1.42)	0.02 (-0.39; 0.43)*
	Лето	0.52	0.57 (0.25; 0.90)	0.81 (0.40; 1.22)	0.01 (-0.21; 0.22)*
Вся территория России	Год	0.97	0.91 (0.17; 1.66)	1.32 (0.73; 1.91)	-0.01 (-0.64; 0.62)*
	Зима	1.45	1.28 (-0.28; 2.83)	1.81 (0.87; 2.75)	0.07 (-1.29; 1.44)*
	Лето	0.52	0.59 (0.11; 1.08)	0.86 (0.12; 1.60)	0.00 (-0.45; 0.45)*
Европейская территория России	Год	0.80	0.87 (-0.05; 1.78)	1.38 (0.56; 2.19)	-0.00 (-0.75; 0.75)*
	Зима	1.48	1.25 (-0.68; 3.18)	2.16 (0.55; 3.77)	-0.25 (-2.21; 1.71)
	Лето	0.35	0.69 (-0.09; 1.47)	0.88 (0.03; 1.74)	-0.01 (-0.77; 0.75)
Западная Сибирь	Год	1.12	0.93 (0.07; 1.79)	1.27 (0.59; 1.95)	-0.05 (-0.78; 0.67)*
	Зима	1.75	1.26 (-0.74; 3.26)	1.72 (0.48; 2.97)	0.18 (-1.55; 1.92)
	Лето	0.58	0.58 (0.04; 1.11)	0.86 (-0.25; 1.96)	-0.00 (-0.59; 0.58)*
Восточная Сибирь	Год	0.90	0.94 (0.24; 1.63)	1.35 (0.74; 1.95)	0.02 (-0.53; 0.57)*
	Зима	1.04	1.33 (0.04; 2.62)	1.69 (0.80; 2.58)	0.16 (-0.62; 0.93)*
	Лето	0.57	0.54 (0.04; 1.04)	0.85 (.17; 1.53)	0.01 (-0.51; 0.53)*
Крайний северо-восток России	Год	0.75	1.10 (0.20; 2.01)	1.56 (0.66; 2.47)	0.05 (-0.48; 0.58)*
	Зима	-0.20	1.61 (-0.21; 3.44)	2.14 (0.79; 3.50)*	0.12 (-0.93; 1.18)
	Лето	0.51	0.67 (0.00; 1.34)	0.99 (0.19; 1.80)	0.09 (-0.46; 0.64)
Континентальная Арктика	Год	0.90	1.00 (0.29; 1.70)	1.36 (0.76; 1.97)	-0.01 (-0.61; 0.59)*
	Зима	1.04	1.37 (0.19; 2.55)	1.77 (0.99; 2.56)	0.08 (-0.79; 0.95)*
	Лето	0.52	0.57 (0.09; 1.04)	0.79 (0.02; 1.55)	0.01 (-0.52; 0.54)

Примечания. 1. Регионы со второго по пятый соответствуют работе (Катцов и др., 2008).

2. Крайний северо-восток России включает Магаданскую область, Камчатский край и Чукотский автономный округ. Континентальная Арктика охватывает территорию суши севернее 60° с.ш.

3. Справа от полученных в модельных ансамблях величин температурных изменений указаны 90%-е интервалы предсказания для них. Интервалы отмечены звездочкой (*), если наблюдаемые изменения выходят за их границы.

Подобный анализ может выполняться и для отдельных крупных регионов. Так на рисунке 2.3.6 для трех модельных ансамблей показаны расчетные и наблюдаемые изменения среднегодовой температуры приземного воздуха в среднем по территории России с указанием границ 90%-ных интервалов предсказания для них. Видно очень хорошее соответствие наблюдаемых и расчетных изменений в ансамбле Hist (рис. 2.3.6а). Среднее по ансамблю близко к наблюдаемому, и модели примерно поровну, делятся на те, в которых изменения больше и меньше наблюдаемых. Наблюдаемое изменение попадает в 90%-й интервал предсказания и для ансамбля Hist-GHG (рис. 2.3.6б). Однако в этом случае только в одной модели (CSIRO-Mk3.6.0) полученное изменение было меньше наблюдаемого. Результаты по ансамблю Hist-Nat полностью расходятся с данными наблюдений (рис. 2.3.6в).

Аналогичный анализ был выполнен и для ряда крупных регионов на территории России. В таблице 2.3.2 для 7 регионов представлены наблюдаемые изменения температуры по данным архива UD и полученные в модельных расчетах средние по модельным ансамблям изменения, а также границы 90%-х интервалов предсказания для них. Результаты, полученные по ансамблю Hist, очень хорошо соответствуют данным наблюдений: во всех случаях наблюдаемые изменения попали в рассчитанные для них интервалы предсказания, а ансамблевые средние оказались в большинстве случаев довольно близкими к данным наблюдений. В ансамбле Hist-GHG наблюдаемые изменения практически во всех случаях попадают в 90%-е интервалы предсказания для них, однако расхождение средних по ансамблю с наблюдаемыми значениями в большинстве случаев

2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

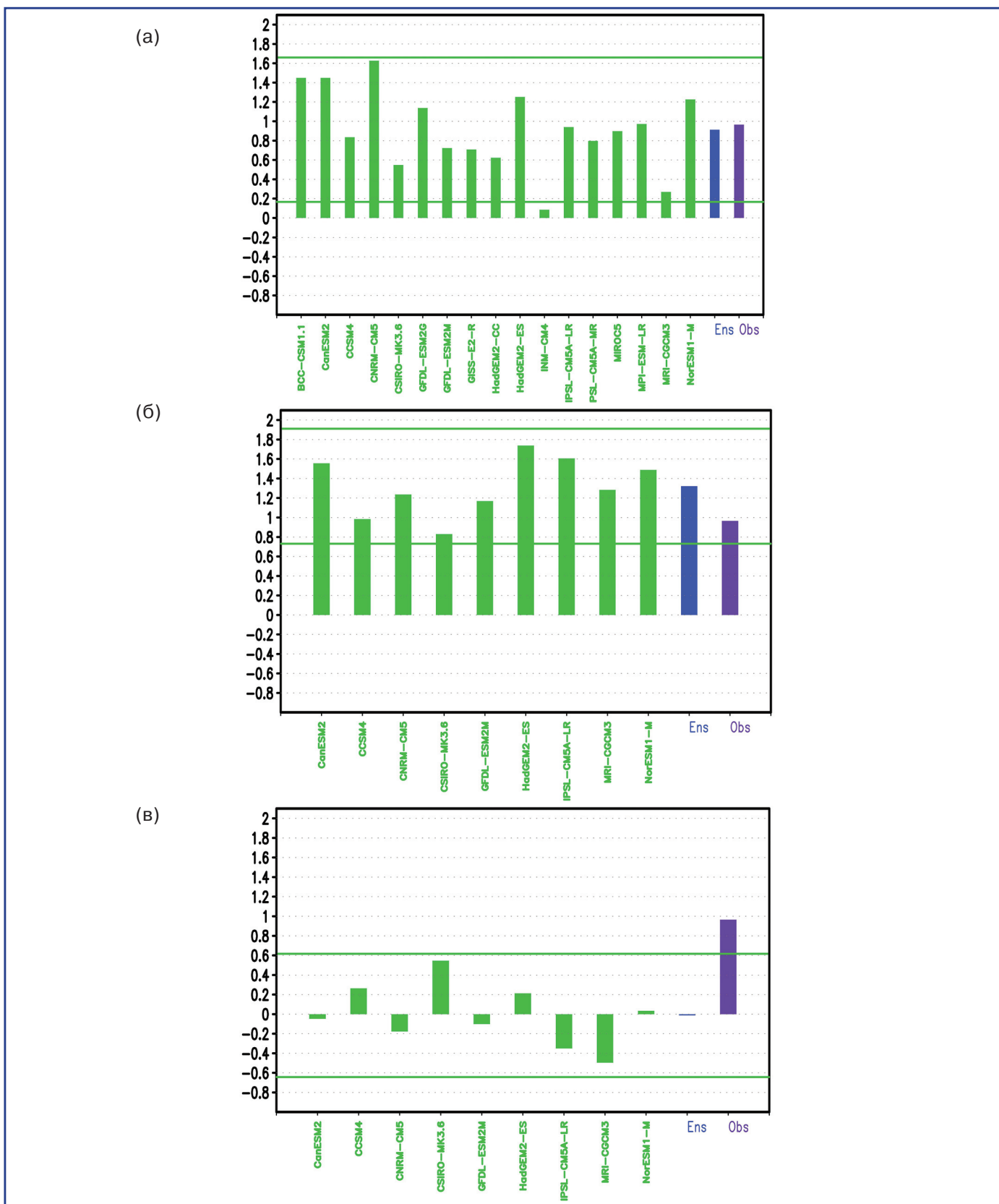


Рис. 2.3.6. Изменения среднегодовой температуры приземного воздуха (°C) в среднем по территории России для периода 1991–2005 гг. по отношению к 1951–1980 гг. для ансамблей Hist (а), Hist-GHG (б) и Hist-Nat (в). Под каждым столбиком указана соответствующая МОЦАО. Последние два столбика соответствует среднему по ансамблю и наблюдаемому изменениям соответственно. Горизонтальные прямые показывают границы 90%-х интервалов предсказания.

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

существенно больше. Интервалы предсказания по ансамблю Hist-Nat по большей части не содержат наблюдаемых изменений.

2.3.3. Установление причин наблюдаемых изменений в интенсивности и частоте возникновения экстремальных температур на территории России методами оптимального обнаружения климатических сигналов

Данные наблюдений показывают изменения региональных экстремальных температур во многих регионах Земного шара в целом согласующиеся с наблюдаемым потеплением. Так, например, уменьшается число морозных дней в средних широтах Северного полушария, во многих регионах увеличиваются теплые экстремумы, а холодные становятся менее холодными. Практически, по всему Земному шару увеличивается частота возникновения необычно теплых сезонных температур, например, таких, которые случаются раз в 10 лет (Hansen et al., 2012). Для оценки антропогенного вклада в такие изменения используются модельные расчеты с отдельным учетом влияния антропогенных и естественных факторов, которые позволяют получить пространственную структуру сигнала, связанного с антропогенным воздействием, а далее применяются методы оптимального обнаружения сигнала (“optimal fingerprinting” или “optimal detection”), которые позволяют значительно увеличить отношение сигнала к шуму. Обзор современных методов, используемых для установления причин климатических изменений, дан, например, в работе (Hegerl, Zwiers, 2011).

Для территории России подобный анализ затрудняется высокой межгодовой изменчивостью, что значительно усложняет отделение сигнала от шума. Возможно, в связи с этим специально для территории России подобные исследования еще не проводились. В значительном числе работ, анализирующих региональные изменения, используется набор крупных регионов на континентах, предложенный в работе (Giorgi, Francisco, 2000). Один из таких регионов представляет интерес для нашего обзора, поскольку большую его часть составляет территория России. Это регион

Северная Азия – NAS (Northern Asia), представляющий собой территорию Азии, попадающую в область (50° – 70° с.ш. 40° – 180° в.д.). Рассмотрим подробнее, какие результаты получены для этого региона.

В работах (Stott et al., 2011; Christidis et al., 2012) для выделения антропогенного сигнала использовались ансамблевые модельные расчеты с двумя МОЦАО HadGEM1 (Великобритания) и MIROC (Япония). Было выполнено две серии расчетов. В первой серии учитывались антропогенные и естественные внешние воздействия, а во второй – только антропогенные воздействия. Для первой модели каждая серия состояла из 4 расчетов, а для второй – из 10. В работе (Stott et al., 2011) по данным наблюдений за температурой приземного воздуха из архива CRUTEM3v для периода 1909–2008 гг. анализировались изменения в частоте возникновения экстремально теплых сезонов, то есть таких, в которых средняя сезонная температура в регионе превышает 90-ю процентиль для контрольного периода 1961–1990 гг. Такие температуры возникают в контрольный период с частотой раз в десять лет. Для региона Северная Азия на базе расчетов с каждой моделью было установлено, что антропогенные воздействия вносят значимый вклад в увеличение частоты возникновения экстремально теплых сезонов летом, осенью и зимой. Для весны расчеты с моделью MIROC также показали значимый антропогенный вклад, тогда как расчеты с моделью HadGEM1 – нет. В работе (Christidis et al., 2012) оценивалось антропогенное влияние на возникновение экстремально высоких среднегодовых температур. Анализировался сдвиг распределений среднегодовых температур в модельных расчетах для периода 2000–2009 гг. по отношению к контрольному периоду 1961–1990 гг. Для региона Северная Азия было показано, что антропогенное воздействие более чем в четыре раза увеличило вероятность появления в 2000–2009 гг. года с температурой, превосходящей максимальную за все время с 1900 г.

Антропогенное влияние было также выявлено в изменениях суточных температур. Так в работе (Zwiers et al., 2011) для периода 1951–2000 гг. анализировались изменения минимальных за год минимальных и максимальных за сутки температур

2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

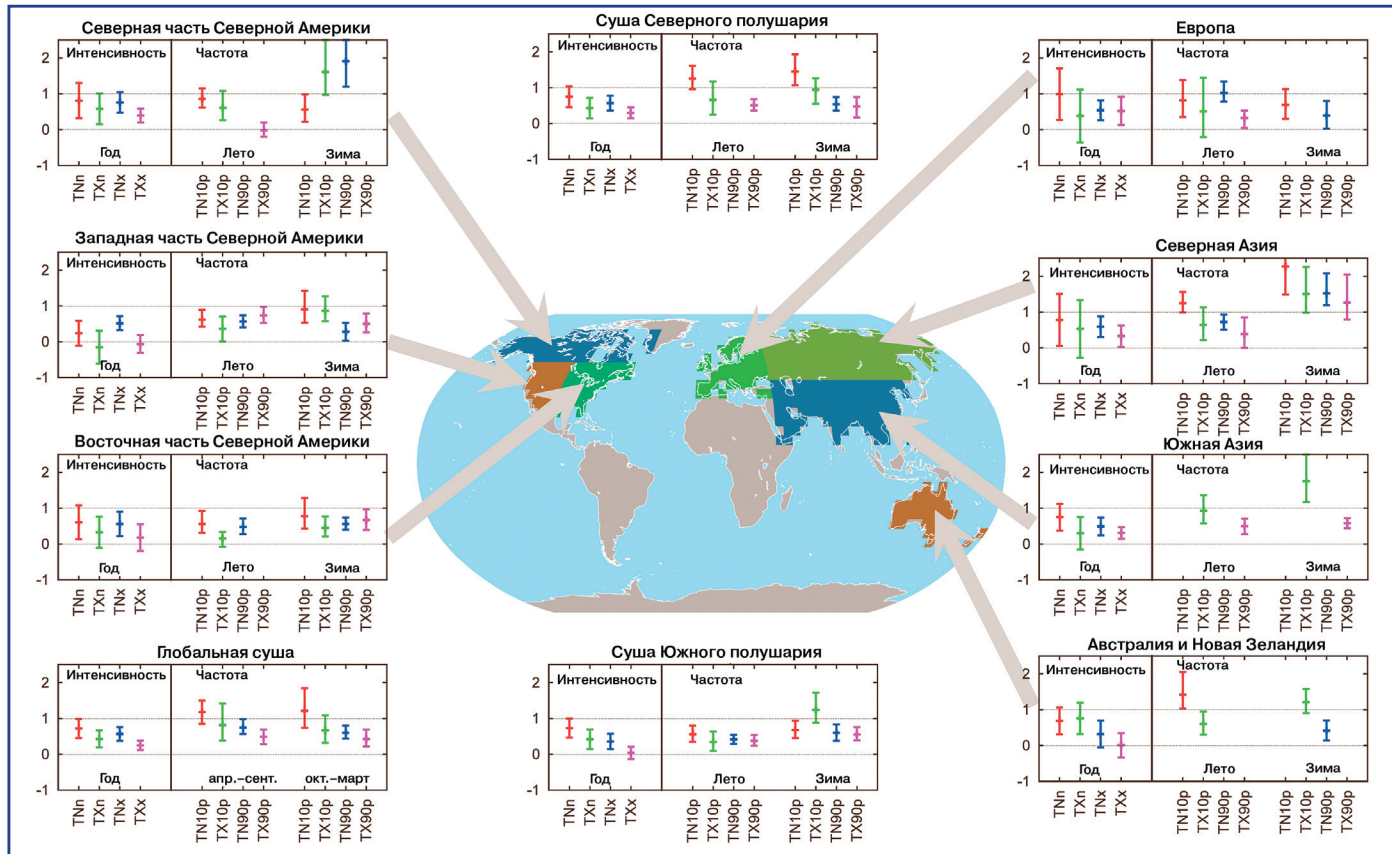


Рис. 2.3.7. Выявление изменений в интенсивности и частоте возникновения экстремальных температур. Левая часть каждого рисунка показывает шкалирующие множители и 90% доверительные интервалы для них для изменений в интенсивности экстремальных явлений в ответ на внешние воздействия в период 1951–2000 гг. Здесь обозначения TNn и TXn соответствуют минимальным за год минимальным и максимальным за сутки температурам, а TNx и TXx – максимальным за год минимальным и максимальным за сутки температурам, оценки основаны на модельных расчетах, учитывающих антропогенные и естественные внешние воздействия (Zwiers et al., 2011). Правая часть каждого рисунка показывает шкалирующие множители и 90% доверительные интервалы для них для изменений в частоте возникновения экстремальных температур в зимнее (с октября по март для Северного полушария и с апреля по сентябрь для Южного полушария) и летнее полугодия. Здесь TN10p и TX10p соответствуют частоте, с которой минимальные и максимальные за сутки температуры оказываются ниже их 10-й перцентили, вычисленной для базового периода 1961–1990, TN90p и TX90p – частоте, с которой минимальные и максимальные за сутки температуры оказываются выше их 90-й перцентили, вычисленной для базового периода 1961–1990 (Morak et al., 2013). Оценки основаны на расчетах с МОЦАО HadGEM1 при учете антропогенных и естественных внешних воздействий. Наличие сигнала установлено на уровне значимости 0.05, если 90% доверительный интервал для шкалирующего множителя находится целиком выше нулевой линии. Серым цветом отмечены области, где данных наблюдений недостаточно для выполнения оценок. Рисунок из работы (Bindoff et al., 2013).

(TNn и TXn, соответственно), а также изменения максимальных за год минимальных и максимальных за сутки температур (TNx и TXx, соответственно). Оценка антропогенного влияния выполнялась на основе расчетов с семью МОЦАО, участвовавшими в проекте CMIP3. Для большинства регионов и, в частности, для региона Северная Азия было выявлено значимое антропогенное влияние в увеличении максимальной за год минимальной за сутки температуры (TNx, рис. 2.3.7).

В работах (Morak et al., 2011; Morak et al., 2013) также рассматривались суточные температуры, анализировались изменения в частоте возникновения экстремальных температур в зимнее (с октября по март для Северного полушария и с апреля по сентябрь для Южного полушария) и летнее полугодия. Точнее для периода 1951–2003 гг. анализировались изменения TN10p и TX10p – частот, с которой, соответственно, минимальные и максимальные за сутки температуры оказывают-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

ся ниже их 10-й процентиля, вычисленной для базового периода 1961–1990 гг., а также TN90p и TX90p – частот, с которыми, соответственно, минимальные и максимальные за сутки температуры оказываются выше их 90-й процентиля, вычисленной для базового периода. Оценка вклада внешних воздействий выполнялась на основе четырех расчетов с МОЦАО HadGEM1 с учетом антропогенных и естественных внешних воздействий. Для региона Северная Азия было выявлено значимое влияние внешних воздействий в изменении всех индексов в зимнее и летнее полугодия за исключением индекса TX90p летом (рис. 2.3.7).

2.3.4. Выявление антропогенного вклада в возникновение аномальных климатических явлений на территории России на примере лета 2010 г.

Поскольку многие из последствий изменения климата, проявляются через экстремальные погодные условия, растет интерес к количественной оценке роли человека и других внешних воздействий на конкретно наблюдавшиеся экстремальные климатические явления. Особый интерес представляет рекордная погодная аномалия на Европейской территории России летом 2010 г. Следст-

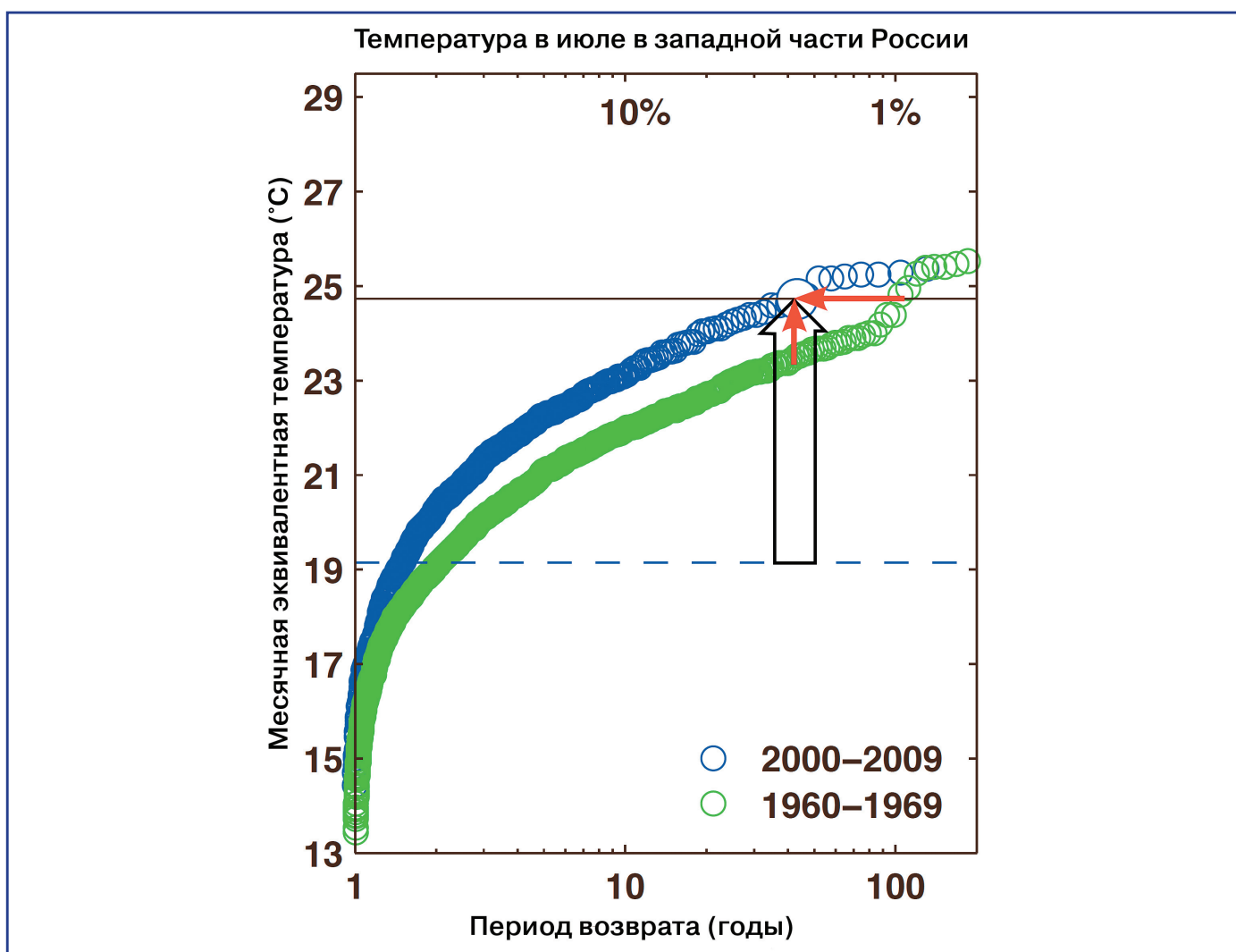


Рис. 2.3.8. Температура в июле в западной части территории России. Результаты оценки периодов возврата аналогов аномалии температура-геопотенциал в июле 2010 г. по данным ансамблевых моделирований за два десятилетия 1960–1969 гг. (зеленый цвет) и 2000–2009 гг. (синий цвет). Вертикальная черная стрелка показывает разницу между средним уровнем температуры 1960–1969 гг. (синий пунктир) и уровнем температуры 2010 г. (черная линия). Вертикальная красная стрелка показывает изменение температуры за счет сдвига распределения, а горизонтальная красная стрелка – изменение в частоте аномалий, аналогичных 2010 году (Otto et al., 2012; Bindoff et al., 2013).

2.3. АНТРОПОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

виями этой аномалии были: экстремальная жара, жесточайшая за последние 120 лет засуха и лесные пожары, приведшие к огромным человеческим и экономическим потерям (Фролов, Страшная, 2011; Мещерская и др., 2011).

Исследованиями, выполненными в России и за рубежом, установлено, что непосредственной причиной аномалии явилось необыкновенно длительное блокирование западного переноса в атмосфере вследствие естественной изменчивости атмосферы и, в частности, нелинейной неустойчивости волн Россби (Шакина, 2011; Шакина и др., 2011; Dole et al., 2011; Barriopedro et al., 2011). Отмечается также вероятная возможность повышения риска подобных аномалий под влиянием климатических изменений, связанных с антропогенным воздействием (Мохов, 2011; Груза, Ранькова, 2011; Rahmstorf, Connou, 2011). По мнению Володина (2011) весомый вклад в формирование экстремальной аномалии температуры воздуха 2010 г. внесла почвенная засуха, образовавшаяся месяцем раньше на пути переноса воздушных масс (Володин, 2011).

Следует признать, что по вопросу о том, в какой степени это событие связано с антропогенным изменением климата, высказывались различные позиции. Авторы эмпирического исследования (Rahmstorf, Connou, 2011) пришли к выводу, что с вероятностью 80% рекорд июля 2010 г. не был бы достигнут без наблюдавшегося тренда крупномасштабного потепления климата. Авторы другой работы (Dole et al., 2011) на основе численного моделирования заключили, что блокирующий антициклон, ставший главным виновником аномалии, возник вследствие внутренней изменчивости атмосферы, а такие факторы как увеличение концентрации парниковых газов, изменение ледового покрова в Арктике и аномалии температуры поверхности океана не оказали решающего влияния на его формирование. Однако было отмечено также, что изменение климата в ближайшие десятилетия может привести к увеличению вероятности возникновения подобных аномально жарких погодных условий на территории Европейской части России.

Более глубокий анализ, выполнен в работе (Otto et al., 2012). По результатам большой серии ансамблевых модельных экспериментов с исполь-

зованием глобальной модели циркуляции атмосферы HadAM3P авторы оценили вероятностные распределения июльской температуры воздуха на западе России, соответствующие десятилетиям 1960–1969 и 2000–2009 гг. При этом было показано, что изменения величины аномалии, подобной наблюдавшейся в 2010 г., по сравнению с самой аномалией (примерно 6°) при фиксированной повторяемости относительно невелики (примерно 1.5°). На рис. 2.3.8 они показаны красной вертикальной стрелкой. Поэтому, с позиции оценки величины наблюдавшаяся аномалия может быть объяснена изменчивостью климатической системы. Более очевидным является изменение в частоте (или времени возврата) условий, подобных аномалии 2010 г. По оценкам авторов эта частота увеличилась за 40 лет приблизительно в 3 раза (см. горизонтальную красную стрелку на рис. 3.2.8).

Таким образом, общий вывод выполненных исследований состоит в том, что возникновение экстремальных условий генерируется внутренней изменчивостью, однако внешние воздействия на климатическую систему и общее потепление увеличивают вероятность их возникновения в будущем.

2.3.5. Литература

- Володин Е. М., 2011.** О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры. В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года, Шакина Н. П. (ред.), М., Триада лтд., с. 48–57.
- Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 2011.** Оценка возможного вклада глобального потепления в генезис экстремально жарких летних сезонов на Европейской территории РФ, Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 47, № 6, с. 717–721.
- Катцов В. М., Мелешко В. П., Говоркова В. А., Надежина Е. Д., Павлова Т. В., Школьник И. М., 2008.** Модели, предназначенные для оценки будущих изменений климата. В кн.: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, т. 1. Изменения климата. М., Росгидромет, с. 112–151.
- Мещерская А. В., Мирвис В. М., Голод М. П., 2011.** Засуха 2010 г. на фоне многолетнего из-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

- менения засушливости в основных зерносеющих районах европейской части России, Труды ГГО, Вып. 563. с. 94–121.
- Мохов И. И., 2011.** Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий, Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 47, № 6, с. 709–716.
- Спорышев П. В., Катцов В. М., Матюгин В. А., 2012.** Согласованность температурных изменений на территории России в ансамблевых модельных расчетах и данных наблюдений, Метеорология и гидрология, № 1, с. 5–19.
- Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2013.** Температурные изменения на территории России по данным наблюдений и результатам модельных расчетов с раздельным учетом антропогенных и естественных внешних воздействий, Труды ГГО, Вып. 568, с. 51–79.
- Фролов А. В., Страшная А. И., 2011.** О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур. В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года, Шакина Н. П. (ред.), М., Триада, лтд., с. 22–31.
- Шакина Н. П. (ред.), 2011.** Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года, М., Триада, лтд., 72 с.
- Шакина Н. П., Иванова А. Р., Бирман Б. А., Скриптунова Е. Н., 2011.** Блокирование: условия лета 2010 года в контексте современных знаний. В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года, Шакина Н. П. (ред.), М., Триада, лтд., с. 6–21.
- Barriopedro D., Fischer E. M., Luterbacher J., Trigo R. M., Garcia-Herrera R., 2011.** The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe, Science, vol. 332 (6026). pp. 220–224. doi: 10.1126/science.1201224.
- Bindoff N. L., Stott P. A., AchutaRao K. M., Allen M. R., Gillett N., Gutzler D., Hansingo K., Hegerl G., Hu Y., Jain S., Mokhov I. I., Overland J., Perlwitz J., Sebbari R., Zhang X., 2013.** Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 867–952.
- Brohan P., Kennedy J. J., Harris I., Tett S. F. B., Jones P. D., 2006.** Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, J. Geophys. Res., vol. 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.
- Christidis N., Stott P. A., Zwiers F. W., Shiogama H., Nozawa T., 2012.** The contribution of anthropogenic forcings to regional changes in temperature during the last decade, Climate Dynamics, vol. 39, pp. 1259–1274.
- Dole R., Hoerling M., Perlwitz J., Eischeid J., Pegion P., Zhang T., Quan X.-W., Xu T., Murray D., 2011.** Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave?, Geophys. Res. Lett., vol. 38, L06702, doi:10.1029/2010GL046582.
- Giorgi F., Francisco R., 2000.** Uncertainties in regional climate change prediction: a regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM, Climate Dynamics, vol. 16, pp. 169–182.
- Hansen J., Sato M., Ruedy R., 2012.** Perception of climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 109, pp. 14726–14727.
- Hegerl G., Zwiers F., 2011.** Use of models in detection and attribution of climate change. WIREs Climate Change, vol. 2, pp. 570–591.
- Min S., Zhang X., Zwiers F., Shiogama H., Tung Y.-S., Wehner M., 2013.** Multimodel detection and attribution of extreme temperature changes, Journal of Climate, vol. 26, pp. 7430–7451.
- Morak S., Hegerl G. C., Kenyon J., 2011.** Detectable regional changes in the number of warm nights, Geophysical Research Letters, vol. 38, L17703. doi:10.1029/2011GL048531
- Morak S., Hegerl G. C., Christidis N., 2013.** Detectable changes in the frequency of temperature extremes. Journal of Climate, vol. 26, pp. 1561–1574.

2.4. ВЛИЯНИЕ НЕАНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТ

- Otto F. E. L., Massey N., van Oldenborgh G. J., Jones R. G., Allen M. R., 2012.** Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L04702, doi:10.1029/2011GL050422.
- Rahmstorf S., Coumou D., 2011.** Increase of extreme events in a warming world, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* vol. 108. no. 44, pp. 17905–17909. doi:10.1073/pnas.1101766108.
- Stott P. A., Jones G. S., Christidis N., W. Zwiers F., Hegerl G., Shiogama H., 2011.** Single-step attribution of increasing frequencies of very warm regional temperatures to human influence, *Atmospheric Science Letters*, vol. 12. pp. 12220– 12227.
- Willmott C. J., Robeson S. M., 1995.** Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air temperature, *International Journal of Climatology*, vol. 15, no. 2, pp. 221–229.
- Zwiers F. W., Zhang, X., Feng Y., 2011.** Anthropogenic influence on long return period daily temperature extremes at regional scales, *Journal of Climate*, vol. 24, pp. 881–892.

Глава 2.4. ВЛИЯНИЕ НЕАНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТ

В. П. Мелешко

Г. В. Алексеев

2.4.1. Введение

Изменения климата происходят в результате собственных колебаний климатической системы и внешних воздействий естественного и антропогенного происхождения. В числе внешних естественных воздействий (на временных масштабах до столетий) в первую очередь обычно рассматриваются изменения потока солнечной радиации и вулканическая активность.

Изменения потока солнечной радиации в результате изменения положения Солнца и Земли вызывает периодические изменения в радиационном воздействии, однако этот фактор играет роль только на временных масштабах в десятки и сотни тысячи лет и более. Кроме того, определенное влияние оказывают колебания солнечной активности (СА) в так называемых циклах, из которых наиболее известен 11-летний цикл. Эти колебания сопровождаются относительно небольшими изменениями общего потока солнечной радиации на временных масштабах от десятилетий до столетий и более.

Вулканическая активность носит эпизодический характер, но может иметь драматические последствия и достаточно быстро влиять на кли-

мат. Воздействие астероидов случается крайне редко, однако считается, что они играли важную роль в истории Земли.

Согласно заключению МГЭИК (Stocker et al., 2013) антропогенное воздействие является основной причиной современного потепления климата. На долю неантропогенных факторов приходится не более 10% наблюдаемого потепления. Вместе с тем принято считать, что потепления климата в 1910–1940-х гг. было вызвано естественными причинами.

2.4.2. Солнечная радиация

Новые измерения солнечной постоянной* (СП) дают величину потока, равную 1360.8 ± 0.5 Вт/м² в течение 2008 года (Корр, Lean, 2011), что на 4.46 Вт/м² меньше по сравнению с величиной, полученной ранее в обсерватории Давос. Меньшая величина потока рассматривается как наиболее достоверная в настоящее время. Расчеты показывают, что изменения потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы на десятые доли процента в моделях общей циркуляции атмосферы дает незначительный эффект при моделировании климата, поскольку существуют большие неопределенности в описании оптических свойств облаков, которые могут оказывать большее влияние на радиационный баланс атмосферы.

* 1 Солнечная постоянная – суммарный поток солнечного излучения, проходящий через единичную площадку, перпендикулярную направлению лучей и находящуюся вне земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца.

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

По данным наблюдений годовые вариации полного потока солнечной радиации между максимум и минимум в 11-ти летнем солнечном цикле составляют примерно 1.0 Вт/м^2 . В работе (Scafetta, Willson, 2009) утверждается, что тренд СП по данным последовательных измерений на разных спутниках между минимумами 1986 и 1996 гг. составлял $0.033\text{--}0.037\%$, что, по их мнению, может давать заметный вклад в потепление.

Недавно на основе данных измерений на спутнике появилось предположение о возможном влиянии нестабильности спектрального состава солнечного излучения (Harder et al., 2009). Оказалось, что уменьшение излучения в коротковолновой части спектра в 2004–2007 гг. компенсировалось его ростом в длинноволновой части. Однако, Lean and DeLand (2012) считают, что этот эффект может быть вызван дрейфом чувствительности прибора, а не изменениями в спектре излучения.

Приведенные примеры показывают, что существуют расхождения в оценках современных изменений СП и ее изменений, основанных на инструментальных наблюдениях на спутниках. Очевидно, что точность восстановления прошлых значений СП на основе косвенных показателей СА, не может быть выше. Еще большая неопределенность существует относительно будущих изменений потока солнечной радиации на границе атмосферы. Если ожидаемое уменьшение солнечной активности будет происходить, то существует вероятность, что уменьшение потока на границе атмосферы отчасти компенсирует прогнозируемый рост радиационного воздействия, вызванный ростом парниковых газов в глобальной атмосфере (Jones et al., 2012).

Согласно новым оценкам, приведенным в (Stocker et al., 2013) за период с 1750 года по настоящее время радиационное воздействие на верхней границе атмосферы изменилось на 0.05 Вт/м^2 в диапазоне разброса $0.00\text{--}0.10 \text{ Вт/м}^2$. По сравнению с антропогенным воздействием, равным 2.29 Вт/м^2 , солнечное воздействие составило лишь 2%.

Как известно, самое большое уменьшение потока солнечной радиации наблюдалось в период Минимума Маундера во второй половине XVII столетия и продолжалось примерно 50 лет. Число

пятен на Солнце тогда сократилось с десятков тысяч до нескольких десятков. Предполагается, что уменьшение потока приходящей на верхнюю границу солнечной радиации способствовало похолоданию климата во время так называемого Малого ледникового периода. Поскольку можно лишь косвенным путем установить примерное число солнечных пятен в тот период, представляется сложным определить, насколько количественно изменился поток приходящей солнечной радиации на границу атмосферы. В ряде исследований, основанных на использовании моделей климата разной степени сложности, принималось, что это уменьшение потока могло быть в диапазоне $0.01\text{--}0.25\%$. Расчеты показали, что уменьшение глобальной температуры воздуха у поверхности Земли составило при этом несколько десятых градуса (Meehl et al., 2013).

Поскольку причины уменьшения активности Солнца в прошлом неизвестны, можно предположить, что в любое время в будущем может снова возникнуть аналогичное уменьшение активности Солнца и тем самым изменится поток приходящей солнечной радиации. Если это случится, то интересно оценить насколько возможное неожиданное глобальное похолодание может компенсировать антропогенное потепление, вызванное ростом парниковых газов в атмосфере. Чтобы ответить на этот вопрос, использовалась совместная модель океан–атмосфера, имеющая высокое разрешение в стратосфере, в которой учитывались фотохимические процессы образования/разрушения озона в стратосфере и спектральная зависимость поглощения солнечной радиации (Meehl et al., 2013). В этом исследовании задавалось значение потока солнечной радиации на 0.25% меньшим по сравнению с современным измеряемым минимумом, полагая при этом, что такое значение было наиболее вероятным в период Минимума Маундера. В расчетах так же включался 11-летний солнечный цикл, повторяющий последние наблюдаемые 4 цикла (для периодов 2009–2052 гг. и 2053–2096 гг.). Большой солнечный минимум получен как среднее из минимальных значений потоков в 1975, 1986 и 1996 гг., уменьшенное на 0.25% . В результате ультрафиолетовый диапазон уменьшился на 8%. Интенсивность солнечного излучения понижалась в течение 5 лет (2020–2024 гг.) до мини-

2.4. ВЛИЯНИЕ НЕАНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТ

мального значения и затем быстро возрастала через 40 лет (2065–2070 гг.) до первоначальной величины перед окончанием эксперимента в 2080 г. Период такой длительности существовал в течение Минимума Маундера, когда наблюдалось лишь несколько солнечных пятен. Выполнено три эксперимента, которые затем сравнивались с расчетами, проведенными по сценарию RCP4.5.

Результаты анализа показали, что солнечный минимум аналогичный минимуму Маундера в середине XXI века может замедлить глобальное антропогенное потепление и уменьшит рост приземной температуры на несколько десятых градуса (0.24–0.26 °C). Этот вывод подтверждается в ранее полученных работах с более простыми моделями климата.

Однако с ростом потока солнечной радиации до первоначальной величины, глобальная температура воздуха восстанавливается до значения, полученного в эксперименте по сценарию RCP4.5. Другими словами, понижение потока солнечной радиации до величины, наблюдавшейся в период Минимума Маундера, лишь замедлит, но не остановит глобальное антропогенное потепление климата.

В работе (Anet et al., 2013) исследовалось влияние уменьшения солнечной активности по типу минимума Дальтона на эволюцию климата и озоновый слой в XXI веке. Это второй по интенсивности минимум (после Минимума Маундера) за последние 400 лет наблюдался в 1790–1820 гг. Проведены три серии ансамблевых экспериментов с помощью модели атмосфера–океан–фотохимия AOCCM SOCOL3-MPIOM с учетом сценария RCP4.5. В одной серии солнечная активность отсутствовала, в двух других она была пониженной при разной интенсивности радиационного воздействия. Показано, что уменьшение потока солнечной радиации не предотвратит продолжающееся антропогенное потепление. Рассчитанная температура за 20 лет в конце XXI века может понизиться, в зависимости от принятых гипотез в сценариях, до 0.3 °C по сравнению со сценарием неизменности солнечной постоянной. Поскольку продолжительность минимума, принятая в данной работе большая, чем в работе (Meehl et al., 2013), расчетное ослабление глобального потепления получилось также несколько большим. Вместе с

тем это не умаляет того факта, что основное потепление связано с антропогенной эмиссией и минимум Дальтона может в лучшем случае вызвать временное уменьшение потепления.

В большинстве исследований влияния СА на климат оценивалось на временных масштабах 11 лет и более. В частности, обнаружено влияние на изменения температуры верхнего слоя океана с масштабом 11 и 70–80 лет при запаздывании в 1–2 года (Gray et al., 2010). Оценки временных масштабов изменений СА, в наибольшей степени влияющих на климат, различаются у разных авторов. Cubbish et al., (2006) считают, что отклик климатической системы на относительно короткие вариации солнечного воздействия больше, чем на длительные. Lovejoy and Schertzer (2012) подтверждают уменьшение этого влияния с увеличением временного масштаба, отмечая при этом, что большинство палеореконструкций указывают на усиление с ростом масштаба колебаний СА. Love et al. (2011) рассматривают как одно из возможных предположение, что влияние солнечно-земного взаимодействия на современные изменения климата проявляется в долговременных трендах.

Помимо статистического анализа связи между изменениями СА и колебаниями характеристик климата, главным образом, температуры, были выполнены эксперименты с глобальными моделями климата с дополнительным форсингом от вариаций СА. Ammann et al. (2007) использовали глобальную модель климата NCAR в серии экспериментов с изменением солнечной активности за последнее тысячелетие, полученным на основе анализа ледяных кернов в Антарктиде. В результате расчетов показано, что при максимальном изменении солнечной постоянной $< 2 \text{ Вт/м}^2$ изменения температуры могут составить 0.1–0.15 °C, максимум на 0.2 °C при высокой чувствительности модели. Расчеты также показывают максимум потепления на 0.2 °C в 1950-е годы, которое затем уменьшается под влиянием усиления вулканической активности. Без учета антропогенного воздействия модель не воспроизводит потепления в конце XX столетия.

В работе Seidenglanz et al. (2012) оценивалась реакция климата на два цикла СА – 90-летнего цикла Глейссберга и 200-летнего цикла де Ври с

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

заданными амплитудами СП в 1 Вт/м^2 с помощью глобальной модели климата. Изучалась реакция глубинных слоев океана на изменения СП. Были найдены когерентности между изменениями СП в каждом из циклов и потенциальной температуры на разных глубинах с запаздываниями до 50 лет для 90-летнего цикла и до 180 лет для 200-летнего цикла в зависимости от региона земного шара.

Jones et al. (2012) исследовали возможное влияния СА на ПТВ в XXI столетии. Для этой цели использовалась энергобалансовая модель, реконструированные данные по СА и проводились сравнения с результатами, полученными по глобальной модели HadCM3. Найдено, что похолодание в результате снижения СА может быть около $0.06\text{--}0.1^\circ\text{C}$, что составляет малую долю ожидаемого потепления к 2100 году.

Swingedouw et al. (2011) оценивали реакцию модельного климата на изменения СА в последнее тысячелетие, полученные по данным реконструкций. Установлено, что колебания средней ПТВ Северного полушария коррелируют (0.74) с колебаниями СА за 1001–1860 гг. Более того, обнаружено влияние СА на Северо-Атлантическое колебание с запаздыванием в 40 лет, в результате смещения зоны тропической конвекции в Тихом океане. Атлантическая меридиональная циркуляция океана в Сев. Атлантике ослабевает при усилении влияния СА.

Из приведенного выше краткого обзора следует, что в последние годы получены интересные результаты по изучению влияния солнечной активности на глобальный климат с помощью физически содержательных моделей атмосфера–океан–криосфера. Вместе с тем необходимо отметить, что интерпретация модельной реакции климата на изменения потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы затрудняется рядом причин. Во-первых, реакция модельного климата зависит от учитываемых обратных связей в конкретной модели и может существенно отличаться в разных моделях. Во-вторых, обнаружение возможной реакции климата на сравнительно слабый сигнал, хотя и действующий в течение продолжительного времени, затрудняется естественной изменчивостью в системе атмосфера–океан–криосфера, имеющей большие временные масштабы релаксации. Чтобы получить досто-

верную реакцию климатической системы на внешнее воздействие, необходимо проводить мультимодельные расчеты. Другими словами, большинство указанных выше модельных результатов требует подтверждения выводов с помощью расчетов с другими независимыми моделями.

2.4.3. Вулканическое радиационное воздействие

Извержение вулканов, в результате которых в атмосферу выбрасывается значительное количество SO_2 , является основной естественной причиной изменения климата на временных масштабах от года до нескольких десятилетий. Хотя вулканические извержения выбрасывают в атмосферу минеральные частицы (пепел) и сульфатный аэрозоль, именно последний, вследствие длительного существования в атмосфере и эффективного рассеяния солнечного света, может оказывать сильное влияние на радиационное перенос и соответственно климат.

При извержении вулканов выбросы CO_2 в атмосферу оказываются, по крайней мере, в 100 раз меньшими, чем антропогенные. Чтобы оказать значительное влияние на климат, сульфатный аэрозоль должен попасть в стратосферу, где время его жизни намного больше, чем в тропосфере. Так, в тропиках время жизни стратосферного аэрозоля может быть около года.

Исследования влияния вулканических извержений на климат уделяется большое внимание. Исследования проводятся как по эмпирическим данным, так и с помощью глобальных моделей климата.

Во второй половине XX века основными извержениями вулканов, повлиявшими на межгодовые колебания глобальной приземной температуры, были извержения вулканов Агунг, Эль-Чичон и Пинатубо. В начале XXI века наблюдалось несколько небольших извержений вулканов, которые оказывали влияние на концентрацию стратосферного аэрозоля, но радиационное воздействие этого аэрозоля на климат было очень малым. Так, в результате двух недавних извержений в высоких широтах (вулкан Казаточи в августе 2008 г. и Саричев в июне 2009 г.), каждый из которых выбросил примерно 1.5 млн т SO_2 в стратосферу, замет-

2.4. ВЛИЯНИЕ НЕАНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТ

ной реакции климатической системы на эти извержения не было установлено. Вместе с тем такие извержения позволили лучше изучить зависимость климатической реакции от количества выброшенного аэрозоля и времени года, когда он выброшен. (Haywood et al., 2010; Kravitz et al., 2011). Радиационное воздействие при извержениях в высоких широтах зависит от потока солнечной радиации и времени жизни вулканического аэрозоля. В работе Kravitz and Robock (2011) показано, что при извержениях в высоких широтах должно быть выброшено не меньше 5 млн т SO₂ в нижнюю стратосферу весной, или летом и намного больше зимой, чтобы обнаружить реакцию климата.

Stenchikov et al. (2006) исследовали с помощью 7 глобальных моделей климата реакцию атмосферы на вулканические извержения в 1980–1999 гг. Было установлено понижение температуры воздуха непосредственно после извержения и усиление в последующую зиму Арктической осцилляции (АО) в средних широтах, которое приводило к повышению температуры. Модели согласованно воспроизводили потепление, но расходились в расчетах усиления АО, которое получалось слабее по сравнению с данными наблюдений.

Из недавних публикаций заслуживает внимание работа Miller et al. (2012), в которой рассматривался 8000-летний ряд следов извержений, реконструированный по данным ледяных кернов из ледников канадской Арктики. Установлено, что внезапное ускорение роста ледников в 1430–1455 гг. произошло после крупных извержений вулканов, которое сопровождалось похолоданиями летом и сокращением таяния льда, что действовало, как обратная связь, сохраняющая тенденцию к понижению температуры воздуха.

Извержение вулканов представляет собой естественный эксперимент по оценке влияния стратосферного аэрозоля на климат. Так, Trenberth and Dai (2007) показали, что азиатский и африканский летние муссоны и глобальный гидрологический цикл был более слабым в следующем году после извержения Пинатубо в 1991 году. Эти наблюдения согласуются с данными климатического моделирования. Поскольку реакция гидрологического цикла в климатической системе ока-

зывается очень быстрой, последствия, связанные с извержением вулканов, могут продолжаться около года.

Можно ли предсказать будущие значимые для климата извержения вулканов? Согласно некоторым историческим данным существует примерно 80-ти летняя периодичность извержения вулканов, однако период наблюдений является коротким и недостаточно надежным. Имеющиеся данные показывают, что 1912–1963 гг. были необычно спокойными за последние 500 лет, а период 1250–1300 гг. отмечен как климатически значимый за предшествующие 1500 лет. Современный уровень знаний позволяет делать прогнозы периодов вулканической активности на основании статистического анализа, полагая, что распределения в недавнем прошлом являлись стационарными.

2.4.4. Влияние собственной изменчивости в океане

Океаническое влияние на изменения климата наиболее заметно в высоких и умеренных широтах Северного полушария, особенно в Арктике, на масштабах от сезона до десятилетий. В то же время основной инструмент прогноза будущего климата – глобальные модели циркуляции атмосферы и океана, неудовлетворительно воспроизводят естественные колебания океанической циркуляции. Следствием такого положения остается нерешенная проблема прогноза естественных изменений климата на период нескольких десятилетий, несмотря на имеющиеся расчеты эволюции климата на более длительные сроки по глобальным моделям при заданном сценарии радиационного воздействия. Основная причина состоит в сложности прогноза естественных колебаний климата, значительная часть которых связана с океаном, и отсутствия необходимых глобальных данных наблюдений о состоянии океана и климатической системы, в целом.

Далека от решения проблема учета влияния экваториальных и тропических областей океана, куда поступает большая часть солнечного тепла и формируются эпизоды Эль-Ниньо, аномально теплые режимы, 60–70-ти летние колебания в Северной Атлантике (Атлантическая междесяти-

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

летняя осцилляция (АМО)) и Тихоокеанская десятилетняя осцилляция (ТДО).

Теплосодержание океана возрастало в последние десятилетия наиболее устойчиво в низких широтах. По оценке Rhein et al. (2013) на долю океана приходится 93% энергии, накопленной климатической системой за период 1971–2010 гг. При этом основная часть потепления приходится на низкие широты Северного полушария (Palmer et al., 2007). В работе Wang et al. (2008) показано, что аномальный прогрев океана в тропической Атлантике может вызвать изменения в переносе тепла и неустойчивость в атмосфере.

Неравномерное глобальное потепление, проявляющиеся на междесятилетних масштабах, связаны с внутренней изменчивостью в океане, на что указывают расчеты с моделью атмосферы, в которых задавались многолетние наблюдаемые колебания в Атлантическом океане. Модель атмосферы воспроизвела междесятилетние колебания температуры воздуха Северного полушария подобные по фазе и амплитуде наблюдаемым с исключенным трендом (Zhang et al., 2007).

В работе (Kravtsov, Spannagle, 2008) междесятилетние колебания глобальной ПТВ определены как разность наблюдаемых изменений и средней по ансамблю моделей СМIP3 температурой, которая не содержит междесятилетних колебаний. Выделенный сигнал напоминает Атлантическую междесятилетнюю осцилляцию (АМО), по видимому связанную с внутренней динамикой океанической термохалинной циркуляции. Имеются основания предполагать, что АМО влияет на полувековой тренд в глобальной ПТВ через прямой региональный вклад в ее изменения.

В отношении изменений океанической и атмосферной составляющих в меридиональном переносе тепла Held (2001) на основе моделирования показал, что обе составляющие изменяются когерентно и с одинаковым знаком. С другой стороны, Vjerknæs (1964) полагал, что поток на верхней границе атмосферы меняется мало и поэтому изменения переноса в атмосфере и океане должны компенсировать друг друга, т. е. имеют противоположные знаки.

Проверка этого положения на модельных расчетах (Van Der Swaluw et al., 2007) показала его справедливость на междесятилетних масштабах,

в то время как на межгодовых масштабах изменений компенсации не происходит: изменчивость потока на верхней границе атмосферы велика. Компенсация хорошо выражена в высоких широтах в районе Гренландского, Исландского и Норвежского морей (Северо-Европейский бассейн), где усиление океанического притока ведет к повышению ТПО, уменьшению температурного градиента и, как следствие, к ослаблению вихревого переноса атмосферой. В области 40–60° с.ш. атмосфера опережает (воздействует на) океан, в высоких широтах 60–80° с.ш. океан воздействует на атмосферу. Максимум этого воздействия приходится на 70° с.ш., при этом океан опережает атмосферу на 1 год.

Исследования возможной быстрой перестройки в атлантической термохалинной циркуляции, выполненные на глобальной модели климата HadCM3, показали, что этому предшествуют быстрые изменения температуры и солёности поверхностного слоя в Северных морях и поступления плотных вод через Датский пролив с опережением примерно на 10 лет (Hawkins, Sutton, 2008).

Наряду с признанием важной роли океана в формировании изменений климата, отмечается, что неопределенность, вносимая накоплением тепла в океане, меньше чем вносимая неадекватным описанием обратных связей в атмосфере (Knutti, Tomassini, 2008). Оценивая роль внутренней изменчивости и внешнего воздействия в изменениях климата по результатам расчетов на глобальных моделях, авторы работы (Sedlacek, Knutti, 2012) пришли к выводу, что потепление в XX столетии вызвано, главным образом внешними причинами.

В настоящее время в научной литературе активно обсуждается наблюдаемая в последние полтора десятилетия “приостановка” глобального потепления: наблюдаемый тренд средней глобальной температуры оказался меньшим, чем средний тренд, полученный в моделях СМIP3, использованных в Четвертом оценочном докладе МГЭИК. Как показано в (Hawkins, Sutton, 2009), тренды в наблюдениях за короткие периоды (десятилетия) могут быть в большей степени обусловлены собственной изменчивостью климатической системы, в значительной мере определяемой естественными колебаниями океана, чем внешним воз-

2.4. ВЛИЯНИЕ НЕАНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТ

действием. Это же свойственно и модельным расчетам (Easterling, Wehner, 2009).

Согласно Пятому оценочному докладу МГЭИК (Stocker et al., 2013), наблюдаемое в 1998–2012 гг. ослабление тренда повышения приземной температуры по сравнению с периодом 1951–2012 гг. приблизительно в равной мере обусловлено ослаблением тренда радиационного воздействия и охлаждением в силу естественной внутренней изменчивости, включая возможное перераспределение тепла в океане.

2.4.5. Литература

- Anet J. G., Rozanov E. V., Muthers S., Peter T., Bronnimann S., Arfeuille F., Beer J., Shapiro A. I., Raible C. C., Steinhilber F., Schmutz W. K., 2013.** Impact of a potential 21st century “grand solar minimum” on surface temperatures and stratospheric ozone, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4420–4425, doi:10.1002/grl.508
- Ammann C. M., Joos F., Schimel D., Otto-Bliesner B. L., Tomas R., 2007.** Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model. *PNAS*, March 6, 2007, vol. 104, no. 10, pp. 3713–3718.
- Bjerknes J., 1964.** Atlantic air–sea interaction, *Advances in Geophysics*, vol. 10, Academic Press, pp. 1–82.
- Cubbish U., Zorita E., Kaspar F., Gonzalez-Rouco J. F., von Storch H., Proommel K., 2006.** Simulation of the role of solar and orbital forcing on climate, *Advances in Space Research* 37, pp. 1629–1634.
- Easterling D. R., Wehner M. F., 2009.** Is the climate warming or cooling?, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, L08706, doi:10.1029/2009GL037810.
- Gray L. J., Beer J., Geller M., Haigh J. D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G. A., Shindell D., van Geel B., White W., 2010.** Solar influences on climate, *Rev. Geophys.*, vol. 48, RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.
- Harder J. W., Fontenla J. M., Pilewskie P., Richard E. C., Woods T. N., 2009.** Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, L07801, doi:10.1029/2008GL036797.
- Hawkins E., Sutton R., 2008.** Potential predictability of rapid changes in the Atlantic meridional overturning circulation, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, L11603, doi:10.1029/2008GL034059.
- Hawkins E., Sutton R., 2009.** The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 90, pp. 1095–1107.
- Haywood, J. M., Jones A., Clarisse L., Bourassa A., Barnes J., Telford P., Bellouin N., Boucher O., Agnew P., Clerbaux C., Coheur, P., Degenstein, D., Braesicke P., 2010.** Observations of the eruption of the Sarychev volcano and simulations using the HadGEM2 climate model, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 115, D21212. doi:10.1029/2010JD014447.
- Held I. M., 2001.** The partitioning of the poleward energy transport between the tropical ocean and atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, vol. 58, pp. 943–948.
- Jones G. S., Lockwood M., Stott P. A., 2012.** What influence will future solar activity changes over the 21st century have on projected global near-surface temperature changes?, *J. Geophys. Res.*, vol. 117, D05103, doi:10.1029/2011JD017013.
- Knutti R., Tomassini L., 2008.** Constraints on the transient climate response from observed global temperature and ocean heat uptake, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, L09701, doi:10.1029/2007GL032904.
- Kopp G., Lean J. L., 2011.** A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38, L01706, doi:10.1029/2010GL045777.
- Kravitz B., Robock A., 2011.** Climate effects of high-latitude volcanic eruptions: Role of the time of year, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 116, D01105.
- Kravitz B., Robock A., Bourassa A., Deshler T., Wu D., Mattis I., Finger F., Hoffmann A., Ritter C., Bitar L., Duck T. J., Barnes J. E., 2011.** Simulation and observations of stratospheric aerosols from the 2009 Sarychev volcanic eruption, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 116, D18211. doi:10.1029/2010JD015501

2. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

- Kravtsov S., Spannagle C., 2008.** Multidecadal Climate Variability in Observed and Modeled Surface Temperatures, *Journal of Climate*, vol. 21, pp. 1104–1121.
- Lean J. L., DeLand M. T., 2012.** How Does the Sun's Spectrum Vary?, *J. Climate*, vol. 25, pp. 2555–2560. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00571.1>:
- Love J. J., Mursula K., Tsai V. C., Perkins D. M., 2011.** Are secular correlations between sunspots, geomagnetic activity, and global temperature significant?, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38, L21703, doi:10.1029/2011GL049380.
- Lovejoy S., Schertzer D., 2012.** Stochastic and scaling climate sensitivities: Solar, volcanic and orbital forcings, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L11702, doi:10.1029/2012GL051871.
- Meehl G. A., Arblaster J. M., Marsh D. R., 2013.** Could a future “Grand Solar Minimum” like the Maunder Minimum stop global warming?, *Geophysical Res. Lett.*, vol. 40, doi:10.1002/grl.50361.
- Miller G. H., Geirsdottir A., Zhong Y., Larsen D. J., Otto-Bliesner B. L., Holland M. M., Bailey D. A., Refsnider K. A., Lehman S. J., Southon J. R., Anderson C., Bjornsson H., Thordarson T., 2012.** Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea–ice/ocean feedbacks, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L02708, doi:10.1029/2011GL050168.
- Palmer M. D., Haines K., Tett S. F. B., Ansell T. J., 2007.** Isolating the signal of ocean global warming, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, L23610, doi:10.1029/2007GL031712.
- Rhein M., Rintoul S. R., Aoki S., Campos E., Chambers D., Feely R. A., Gulev S., Johnson G. C., Josey S. A., Kostianoy A., Mauritzen C., Roemmich D., Talley L. D., Wang F., 2013.** Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 255–315.
- Scafetta N., Willson R. C., 2009.** ACRIM-gap and TSI trend issue resolved using a surface magnetic flux TSI proxy model, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, L05701, doi:10.1029/2008GL036307.
- Sedlacek J., Knutti R., 2012.** Evidence for external forcing on 20th-century climate from combined ocean–atmosphere warming patterns, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L20708, doi:10.1029/2012GL053262.
- Seidenglanz A., Prange M., Varma V., Schulz M., 2012.** Ocean temperature response to idealized Gleissberg and de Vries solar cycles in a comprehensive climate model, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L22602, doi:10.1029/2012GL053624.
- Stenchikov G., Hamilton K., Stouffer R. J., Robock A., Ramaswamy V., Santer B., Graf H.-F., 2006.** Arctic Oscillation response to volcanic eruptions in the IPCC AR4 climate models, *J. Geophys. Res.*, vol. 111, D07107, doi:10.1029/2005JD006286.
- Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Alexander L. V., Allen S. K., Bindoff N. L., Breon F.-M., Church J. A., Cubasch U., Emori S., Forster P., Friedlingstein P., Gillett N., Gregory J. M., Hartmann D. L., Jansen E., Kirtman B., Knutti R., Krishna Kumar K., Lemke P., Marotzke J., Masson-Delmotte V., Meehl G. A., Mokhov I. I., Piao S., Ramaswamy V., Randall D., Rhein M., Rojas M., Sabine C., Shindell D., Talley L. D., Vaughan D. G., Xie S.-P., 2013.** Technical Summary. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–115.
- Swingedouw D., Terray L., Cassou C., Voldoire A., Salas-Melia D., Servonnat J., 2011.** Natural forcing of climate during the last millenium: Fingerprint of solar variability. Low frequency solar forcing and NAO, *Clim. Dyn.*, vol. 36, 1349–1364, doi:10.1007/s00382-010-0803-5.

2.4. ВЛИЯНИЕ НЕАНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТ

- Trenberth K. E., Dai A., 2007.** Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, L15702, doi:10.1029/2007GL030524.
- Van Der Swaluw E., Drijfhout S. S., Hazeleger. Bjerknæs W., 2007.** Compensation at High Northern Latitudes: The Ocean Forcing the Atmosphere, *Journal of Climate*, vol. 20, pp. 6023–6032.
- Wang C., Lee S.-K., Enfield D. B., 2008.** Climate Response to Anomalously Large and Small Atlantic Warm Pools during the Summer, *Journal of Climate*, vol. 21, pp. 2437–2450.
- Zhang R., Delworth T. L., Held I. M., 2007.** Can the Atlantic Ocean drive the observed multi-decadal variability in Northern Hemisphere mean temperature? *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, L02709, doi:10.1029/2006GL028683.