
6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

Ведущие авторы: П. В. Спорышев, В. М. Мирвис

Авторы: В. М. Катцов, В. П. Мелешко, Э. Я. Ранькова

Рецензент: член-корреспондент РАН И. И. Мохов

6.1. Введение

В настоящей главе рассматриваются вопросы, связанные с обнаружением климатических изменений и установлением физических причин, приводящих к таким изменениям. Под климатическими изменениями понимаются изменения в статистических характеристиках климатической системы Земли, обнаруживаемые в течение продолжительного времени, обычно в течение нескольких десятилетий или больше. Точные определения основных терминов, связанных с задачей анализа климата и климатической изменчивости по данным наблюдений, можно найти, например, в работе (Груза, Ранькова, 2004). Климатические изменения могут быть вызваны внутренними процессами, происходящими в климатической системе, или же внешними воздействиями. Некоторые внешние воздействия, например, изменения в величине приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы или изменения в концентрации атмосферного аэрозоля после вулканических извержений, имеют естественные причины и вносят вклад в общую естественную изменчивость климатической системы. Тогда как другие, в частности изменения газового состава атмосферы, продолжающиеся с начала промышленной революции, являются результатом хозяйственной деятельности человека. В настоящей главе рассматриваются научные подходы к выяснению природы климатических изменений. Другими словами, как установить какие изменения климата вызваны хозяйственной деятельностью (антропогенный вклад), а какие имеют естественную природу?

Для абсолютно точного установления причин наблюдаемых климатических изменений требуется серия контролируемых экспериментов с климатической системой Земли, что, очевидно, невозмож-

но. Поэтому в современной науке 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. Отметим также, что при сравнении аккуратно учитывается доступность данных наблюдений в разные периоды времени, чтобы быть уверенными, что полученные результаты не являются искусственным следствием изменений в системе наблюдений.

Используемые при сравнении статистические процедуры основываются как на линейных, так и на нелинейных методах анализа данных. Сейчас широко распространены методы анализа пространственно-временных структур, возникающих во временных рядах климатических переменных (блок 6.1). Поскольку применяемые методы являются статистическими по своей природе, всегда существует малый риск получения ошибочных выводов. Для уменьшения этого риска используется комплексный подход к анализу имеющихся данных, когда ожидаемая реакция климатической системы на внешние воздействия проверяется одновременно на целом ряде слабо связанных между собой климатических переменных. Такой подход позволяет получить широкую картину развития климатических процессов во времени и суще-

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

ственно ослабляет влияние естественной климатической изменчивости на полученные результаты.

Поскольку модельные расчеты предоставляют основу для проведения анализа причин климатических изменений, важно понять, почему и до какой степени можно быть уверенными в их правильности. Климатические модели являются математическими инструментами, которые позволяют представить климатическую систему в виде системы программ, что дает возможность воспроизводить климатические явления в экспериментах на мощных современных вычислительных машинах. Уверенность в правильности таких расчетов базируется, во-первых, на том, что в основе моделей лежат твердо установленные физические законы — законы гидромеханики, законы термодинамики, законы переноса радиационного излучения и др. Кроме того, включаемые в модели схемы параметризации отдельных физических процессов проверяются независимо на широкой базе имеющихся наблюдений. Вторым важным источником уверенности в модельных результатах является способность моделей воспроизводить важные характерные особенности современного климата. Качество модельного воспроизведения современного климата постоянно проверяется в сравнениях, использующих огромную массу доступных к настоящему времени данных наблюдений. В последние годы в таких сравнениях все чаще стали использовать результаты согласованных мультимодельных ансамблевых расчетов, что позволило значительно полнее оценить качество модельного воспроизведения современного климата, а также установить вероятностные пределы для межмодельного разброса. Модели достаточно хорошо воспроизводят наблюдаемые крупномасштабные особенности распределения полей температуры, влажности и скорости ветра в атмосфере, географические особенности распределения радиационных полей на верхней границе атмосферы и на поверхности земли, полей скорости приземного ветра, температуры поверхности океанов, океанических течений и ледяного покрова. Модели способны воспроизводить основные черты наблюдаемой климатической изменчивости на разных временных масштабах. Отметим в качестве примеров способность моделей воспроизво-

дить усиление и ослабление муссонных систем, сезонные сдвиги в полях приземной температуры воздуха и осадков, а также сезонные изменения основных барических колебательных систем и путей циклонов. Ряд климатических моделей (или их близких аналогов) используется для составления прогнозов погоды на разные сроки, включая сезонные прогнозы. Модельные прогнозы показали способность моделей воспроизводить важные черты общей циркуляции атмосферы на коротких временных интервалах, а также ряд аспектов межгодовой изменчивости. Неспособность моделей предсказывать погоду за пределами интервала в несколько дней не умаляет их способности предсказывать долгосрочные климатические изменения, поскольку это совершенно разные виды прогнозов (подробнее см. главу 5). Еще одним аргументом, поддерживающим уверенность в модельных расчетах, является способность моделей воспроизводить климат прошлого, а также его эволюцию во времени. Так, модели использовались для воспроизведения наиболее холодного и сурового интервала последнего оледенения четвертичного периода (примерно 21000 лет назад), а также теплого климатического оптимума голоцена (максимум потепления — около 6000 лет назад), когда температура в Европе была в летний период в среднем на 2–3°C выше современной. Модели смогли воспроизвести много характерных черт климатических изменений этих периодов (известных с точностью до неопределенностей, возникающих при реконструкции климата прошлого), в частности величину и крупномасштабную структуру похолодания в Мировом океане во время последнего оледенения. И, наконец, модели довольно точно воспроизводят климатические изменения периода инструментальных наблюдений. Этот вопрос подробно рассматривается в последующих разделах настоящей главы. В то же время в модельных расчетах сохраняется значительная доля неопределенности, отчасти связанная с неточностями модельной реализации физических процессов в атмосфере и океане, например, процессов образования облачности, что ведет к неточности в величине и времени наступления моделируемых климатических изменений, а также отражается на их географической структуре.

Блок 6.1. Методы, используемые для установления причин климатических изменений

Для установления причин климатических изменений необходимо знать форму климатического сигнала, т. е. пространственную или пространственно-временную структуру изменений климата, соответствующую каждому из возможных внешних воздействий на климатическую систему. Эти сигналы рассматриваются как статистические гипотезы, апостериорная вероятность которых используется для оценки роли рассматриваемых внешних воздействий. Климатические сигналы могут быть получены только с помощью моделирования. При этом для выделения влияния антропо-

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

генных и естественных факторов на климатическую систему важно, чтобы климатические сигналы, соответствующие этим факторам, существенно различались между собой.

Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере приводит к потеплению в тропосфере и похолоданию в стратосфере. Причем увеличение температуры приземного воздуха на материках по сравнению с океанами больше вследствие того, что реакция на изменение радиационного баланса поверхности на них проходит быстрее (рис. 6.1*а*). Изменение концентрации сульфатного аэрозоля ведет к похолоданию почти во всей атмосфере с наибольшим понижением температуры воздуха над континентами Северного полушария, что в значительной степени блокирует здесь быстрое потепление, вызываемое парниковыми газами (рис. 6.1*б*). Изменение концентрации атмосферного озона приводит к потеплению в тропосфере и похолоданию в стратосфере, особенно в высоких широтах, где потери общего содержания атмосферного озона наибольшие (рис. 6.1*в*). Три рассмотренных выше фактора вносят основной вклад в антропогенное воздействие на климатическую систему.

Изменение потока солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы, отражается в общем потеплении всей атмосферы (рис. 6.1*а*). Изменение вулканической активности приводит к похолоданию на поверхности земли и в тропосфере, сопровождающемуся потеплением в стратосфере. Причем реакция на вулканические извержения длится несколько лет, а ее пик наступает через несколько месяцев после извержения. Конец XX века характеризовался увеличением вулканической активности, что привело к небольшому потеплению в нижней стратосфере и у поверхности земли в высоких широтах и к похолоданию в других областях (рис. 6.1*б*). Два этих воздействия вносят существенный вклад в формирование естественной климатической изменчивости. Суммарное воздействие как антропогенных, так и естественных факторов отражается в потеплении у земной поверхности и похолодании в стратосфере (рис. 6.1*в*).

Для выявления причин климатических изменений в настоящее время широкое распространение получил так называемый метод “оптимального обнаружения сигнала” (“optimal fingerprinting” или “optimal detection”), который позволяет значительно увеличить отношение сигнала к шуму (Hasselmann, 1979, 1997; Allen and Tett, 1999). В этом методе использована обобщенная модель множественной регрессии $y = Xb + e$, где вектор y содержит фильтрованную версию наблюдаемого ряда, матрица X — оценки откликов на известные воздействия на климатическую систему (сигналы изменения климата) и вектор e — естественный климатический шум, который является результатом внутренних источников. Предполагается, что вектор e — реализация гауссова случайного вектора с ковариационной матрицей C . Матрица X , как правило, оценивается с помощью МОЦАО в специальных экспериментах по моделированию откликов климатической системы на рассматриваемые воздействия. Сигнал обычно представлен как некая пространственно-временная структура, определенная на интервале 50–100 лет (например, 1950–1999 гг. или 1900–1999 гг.), и оценивается осреднением по ансамблю модельных реализаций климата при заданных воздействиях. Вектор параметров b (множителей масштаба) дает возможность оценить ошибки оцененных сигналов и измерить соответствие сигналов, содержащихся в матрице X , изменениям, которые взяты из наблюдений. Ковариационная матрица C , характеризующая внутреннюю изменчивость, обычно оценивается по результатам длительного контрольного эксперимента, проводимого без влияния внешних воздействий.

Вопросы обнаружения климатических изменений решаются посредством дедуктивных умозаключений (относительно других механизмов, не включенных в модель климата, которые могут правдоподобно объяснить наблюдаемые изменения) в сочетании с проверкой определенных гипотез относительно b . Постулируемый сигнал изменения климата считается обнаруженным, если его амплитуда в наблюдениях значимо больше нуля. То есть в стандартном методе оптимального обнаружения сигнала проверяется нулевая гипотеза $H_0: b = 0$, где 0 — вектор нулей. Оценка вектора b , применяемая при проверке гипотезы, получается из формулы $b = (X^T C^{-1} X)^{-1} X^T C^{-1} y$. Такая оценка, используемая в большинстве методов оптимального обнаружения, позволяет увеличить отношение сигнала к шуму и таким образом ослабить влияние естественной климатической изменчивости на статистический вывод (Hasselmann, 1979; Allen and Tett, 1999; Mitchell et al., 2001).

Выявление причин климатических изменений состоит в установлении причинно-следственной связи между наблюдаемым изменением и предполагаемыми внешними воздействиями. Для надежного установления причин изменений необходимо: обнаружение изменений, исключение других правдоподобных причин и доказательство, что наблюдаемое изменение согласуется с оцененным откликом на внешнее воздействие (т. е. $b = 1$, где 1 — вектор единиц). Классический метод оптимального обнаружения использует в качестве критерия для проверки гипотез “тест уверенности атрибуции”

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

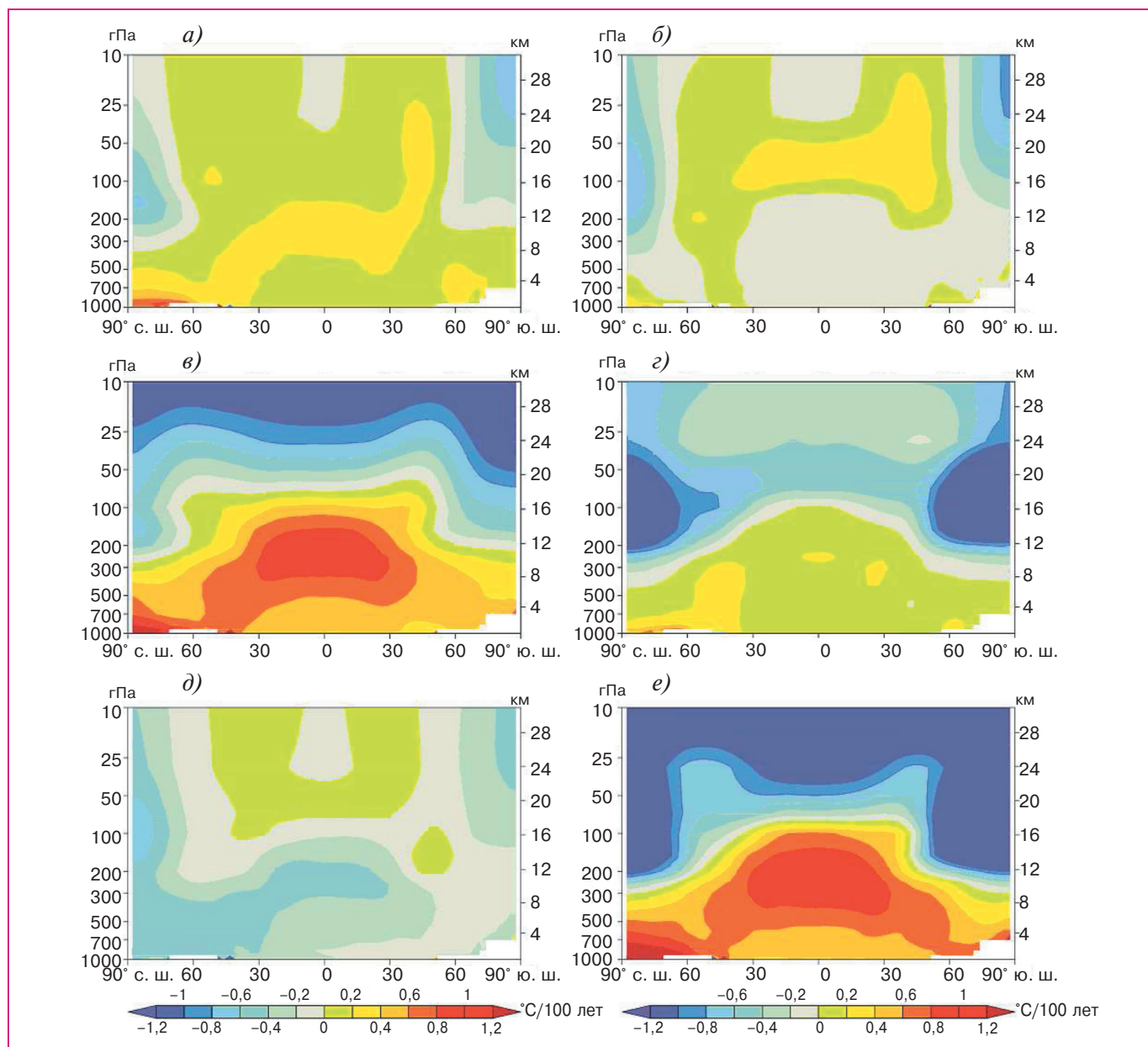


Рис. 6.1. Модельные линейные тренды зонально осредненной температуры воздуха за период 1890–1999 гг. ($^{\circ}\text{C}/100$ лет), вызываемые воздействием изменений приходящего излучения на верхней границе атмосферы (а), вулканической активностью (б), а также изменениями концентрации хорошо перемешанных парниковых газов в атмосфере (в), тропосферного и стратосферного озона (г) и сульфатного аэрозоля (д). Суммарный результат всех воздействий показан на рисунке е. Рисунок выполнен по результатам расчетов с моделью PCM климатического центра NCAR, США (Hegerl et al., 2007).

(attribution consistency test) для проверки нулевой гипотезы $H_A: \mathbf{b} = 1$ (Hasselmann, 1997; Allen and Tett, 1999). Формально уверенное заключение возможно, если гипотеза H_A не может быть отклонена. Однако неправомочность отклонения H_A указывает лишь на недостаток доказательств против H_A , но не является доказательством в пользу H_A , которое действительно необходимо для поддержки сделанного заключения.

Подход Байеса обеспечивает альтернативу стандартному (частотному) подходу к проверке гипотез и последовательно решает три основных задачи:

1) получить функцию правдоподобия для вектора амплитуд \mathbf{b} посредством оптимального (обобщенного) регрессионного анализа в предположении, что \mathbf{e} является гауссовым случайным вектором;

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

2) вычислить апостериорное распределение вероятности амплитуд, воспользовавшись теоремой Байеса, которая объединяет априорные знания об амплитудах (в форме априорного распределения вероятностей) с функцией правдоподобия, полученной в 1);

3) оценить достоверность обнаружения и атрибуции, проверяя апостериорные вероятности с помощью надлежащим образом определенных критериев.

Важное преимущество байесовского подхода состоит в том, что неопределенность учитывается более полно, чем при стандартном частотном подходе. Как и при частотном подходе, неопределенность вследствие внутренней климатической изменчивости (величина ϵ в регрессии) учтена через функцию правдоподобия. Однако с помощью байесовского подхода можно также оценить неопределенность модельной оценки климатического сигнала, определив надлежащим образом априорное распределение \mathbf{b} .

Байесовские исследования по обнаружению и установлению причин климатических изменений, выполненные до настоящего времени, не изменяют выводов, полученных ранее при стандартном частотном подходе. Тем не менее вероятно, что байесовский подход найдет широкое использование в будущих исследованиях, поскольку байесовская техника более полно включает информацию о неопределенности (благодаря использованию априорного распределения) и обеспечивает вероятностные результаты, которые в большей мере пригодны для принятия решений и разработки долгосрочной политики.

6.2. Причины наблюдаемых изменений климата

Факт глобального потепления климата не вызывает сомнений: глобальное повышение температуры воздуха и океана, сокращение площади морского льда, повышение уровня моря — очевидны. Настоящий раздел в значительной степени основывается на материалах ОД4 МГЭИК (Hegerl et al., 2007).

Прямое сравнение данных наблюдений за глобальной температурой приземного воздуха с результатами модельных расчетов дает убедительные аргументы в пользу антропогенной природы наблюдаемого потепления (рис. 6.2). К настоящему времени выполнено большое количество ансамблевых расчетов с МОЦАО по воспроизведению климатических изменений в период инструментальных наблюдений. Используемые 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. Было выполнено две серии расчетов (Hegerl et al., 2007). В первой серии учитывались и антропогенные, и естественные внешние воздействия (АЕВ), а во второй только естественные (ЕВ). В расчетах с ЕВ учитывались наблюдаемые изменения в потоке приходящего солнечного излучения на верхней границе атмосферы, а также изменения концентрации атмосферного аэрозоля естественной природы, в частности вулканического аэрозоля. В расчетах с АЕВ кроме этих факторов во внимание принимались наблюдаемые изменения концентрации парниковых газов в атмосфере, включая изменения концентрации тропосферного

и стратосферного озона, изменения аэрозольного состава атмосферы, вызванные хозяйственной деятельностью человека, в частности, изменения содержания сульфатного аэрозоля, а в некоторых экспериментах учитывались также изменения в природопользовании. Заметим, что внешние воздействия отличались между экспериментами с разными моделями из-за того, что не все модели принимали во внимание полный набор внешних воздействий, а также потому, что использовались разные алгоритмы расчета их влияния на атмосферную циркуляцию. Несмотря на эти дополнительные неопределенности, существует явное различие между АЕВ и ЕВ ансамблями (рис. 6.2). Только в экспериментах, учитывающих антропогенные внешние воздействия, хорошо воспроизводится наблюдаемое повышение температуры воздуха, в экспериментах с ЕВ глобальная температура в последние десятилетия XX века понижается.

Изменения средней глобальной температуры или температуры полушарий в значительной степени контролируются внешними воздействиями (Stott et al., 2000), что подтверждает сравнение двух рассматриваемых модельных ансамблей (АЕВ и ЕВ эксперименты). Члены каждого ансамбля показывают схожую десятилетнюю изменчивость глобальной температуры приземного воздуха. Меньшая изменчивость средней по ансамблю температуры в расчетах с АЕВ по сравнению с наблюдаемой температурой может быть объяснена подавлением шумов в межгодовой изменчивости в результате ансамблевого осреднения. Современные МОЦАО хорошо воспроизводят статистические характеристики межгодовой изменчивости, а также дают правильную картину влияния извержений крупных вулканов на изменения температуры (рис. 6.2).

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

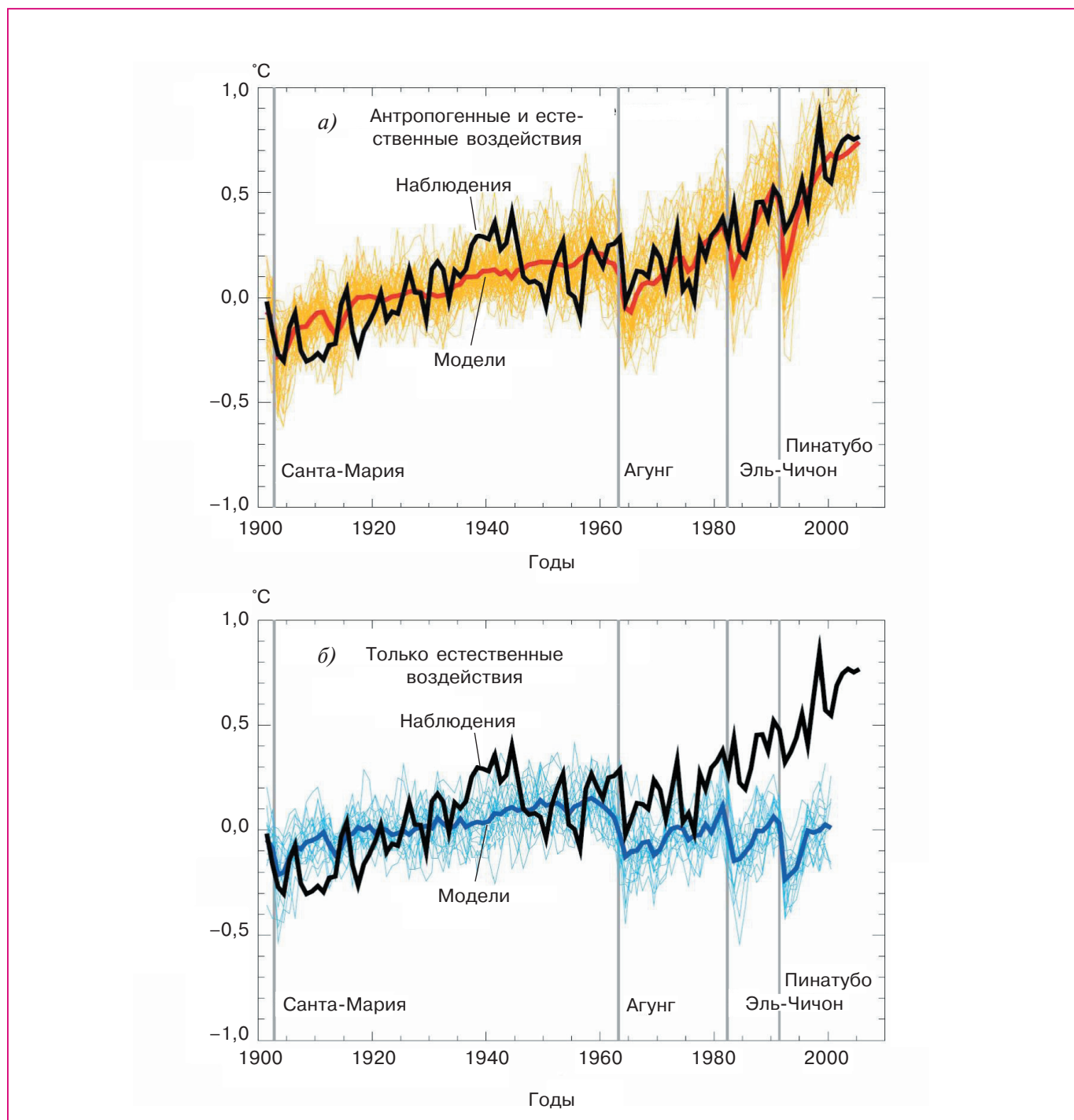


Рис. 6.2. Аномалии средней глобальной температуры приземного воздуха по данным наблюдений (черная линия) и моделирования с учетом антропогенных и естественных внешних воздействий (а) и только естественных воздействий (б). К естественным воздействиям, в частности, относятся изменения приходящего солнечного излучения и влияние вулканической деятельности на аэрозольный состав атмосферы, а к антропогенным — изменения концентрации атмосферных парниковых газов и сульфатного аэрозоля. Аномалии рассчитаны по отношению к среднему за 1901–1950 гг. На рисунке а представлены результаты 58 расчетов по 14 МОЦАО. Результаты расчетов по разным моделям показаны тонкими желтыми линиями, а среднее по мультимодельному ансамблю — жирной красной линией. Аналогично на рисунке б представлены результаты 19 расчетов по 5 моделям. Результаты расчетов по разным моделям показаны тонкими голубыми линиями, а среднее по мультимодельному ансамблю — жирной синей линией. Серыми линиями отмечено время наиболее значительных извержений вулканов. Рисунок из работы (Hegerl et al., 2007).

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

Следует отметить, что межгодовая изменчивость средней глобальной температуры в первой половине XX века воспроизводится модельным ансамблем несколько хуже, чем во второй половине века, хотя и в этот период модельный тренд потепления близок к наблюдаемому. В современной литературе отмечаются несколько факторов, которые могут объяснить указанные различия. Исследователи сходятся в том, что для правильного воспроизведения эволюции температуры в первой половине века необходимо в модельных расчетах достаточно полно учитывать как антропогенные, так и естественные внешние воздействия. В частности в работе (Broccoli et al., 2003) показано, что в ансамбле из трех экспериментов с МОЦАО GFDL R30 удается довольно точно воспроизвести эволюцию средней глобальной температуры на протяжении всего XX века, если кроме антропогенных внешних воздействий учесть также изменения приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы и изменения концентрации стратосферного аэрозоля вулканической природы. Однако этот результат получается не во всех моделях. Например, в МОЦАО MIROC3.2 для правильного воспроизведения изменений температуры в первой половине и середине XX века кроме указанных выше внешних воздействий надо принимать во внимание изменения концентрации углеродного аэрозоля, которые не учитываются в большинстве моделей, представленных на рис. 6.2 (Nagashima et al., 2006). Кроме того, в ряде работ отмечается, что довольно значительные колебания средней глобальной температуры могут быть обусловлены естественной изменчивостью в глобальной системе взаимодействия атмосфера — океан. В частности в работе (Knight et al., 2005) показано, что многолетние естественные колебания температуры поверхности Атлантического океана могут объяснить аномалии средней температуры Северного полушария величиной до $0,2^{\circ}\text{C}$. Такие колебания отмечаются в данных наблюдений и воспроизводятся в модельных расчетах. Время одного колебания охватывает период в несколько десятилетий (около 65 лет по данным наблюдений). Физические механизмы, вызывающие такие колебания, связаны с обменными процессами в глубоком океане.

Влияние антропогенного воздействия на температуру приземного воздуха обнаруживается в модельных расчетах не только глобально, но и отдельно на каждом континенте (рис. 6.3) за исключением Антарктиды, где недостаточно данных наблюдений для достоверных выводов (подробнее об антропогенном влиянии на климат Антарктиды см., например, (Мохов и др., 2006а)). Для каждого континента расчеты с АЕВ показывают повышение температуры в последние три десятилетия XX века, близкое к наблюдаемому, чего нет в расчетах с ЕВ.

Региональные особенности наблюдаемого потепления воспроизводятся в модельных экспериментах значительно хуже, но можно сказать, что общая пространственная структура рассчитанного потепления довольно близка к наблюдаемой. Наблюдаемые тренды температуры за весь XX век (рис. 6.4а) положительны почти везде за исключением юго-восточной части США, северной части Северной Атлантики и отдельных районов в Африке и Южной Америке. Такая структура трендов плохо согласуется с известными модами естественной долгопериодной климатической изменчивости. Так, например, повышение температуры поверхности в экваториальной части Тихого океана (явление Эль-Ниньо) сопровождается похолоданием в северной и южной его частях, что выражается в пространственно неоднородной картине изменений температуры. С другой стороны, расчеты с АЕВ (рис. 6.4б) показывают пространственно довольно однородное потепление, близкое к наблюдаемому. В расчетах с ЕВ картина совершенно иная (рис. 6.4д, е). Кроме того, только эксперименты, учитывающие антропогенное воздействие, достаточно хорошо воспроизводят тренды средней зональной температуры приземного воздуха как в период 1901–2005 гг., так и в период 1979–2005 гг. (рис. 6.4ж, з). Хотя повышение температуры в низких широтах меньше, чем в высоких, здесь и межгодовая изменчивость значительно меньше. По этой причине и сигнал устойчивого потепления в низких широтах обнаруживается значительно раньше. Такая временная эволюция потепления хорошо воспроизводится моделями в экспериментах с АЕВ, что дает еще один аргумент в пользу антропогенной природы наблюдаемого потепления (блок 6.2). Ни одна модель, учитывающая только естественные воздействия, не смогла воспроизвести повышение глобальной температуры приземного воздуха во второй половине XX века, близкое к наблюдаемому. Таким образом, прямое сравнение модельных расчетов с данными наблюдений показывает, что потепление с высокой степенью вероятности имеет антропогенную, а не естественную природу, что подтверждают и формальные методы установления причин климатических изменений, рассматриваемые ниже.

В последние годы выполнено много исследований, использующих формальные статистические методы для выделения вклада отдельных внешних воздействий в наблюдаемое глобальное потепление (обзор этих исследований дан в работе (IDAG, 2005)). В расчетах, на которых основывались эти исследования, использовались разные МОЦАО и разные схемы параметризации внешних воздействий. Кроме того, и сама техника статистического анализа была разной. Несмотря на эти различия, все работы показывают значительный антропогенный вклад в глобальное потепление. В качестве

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

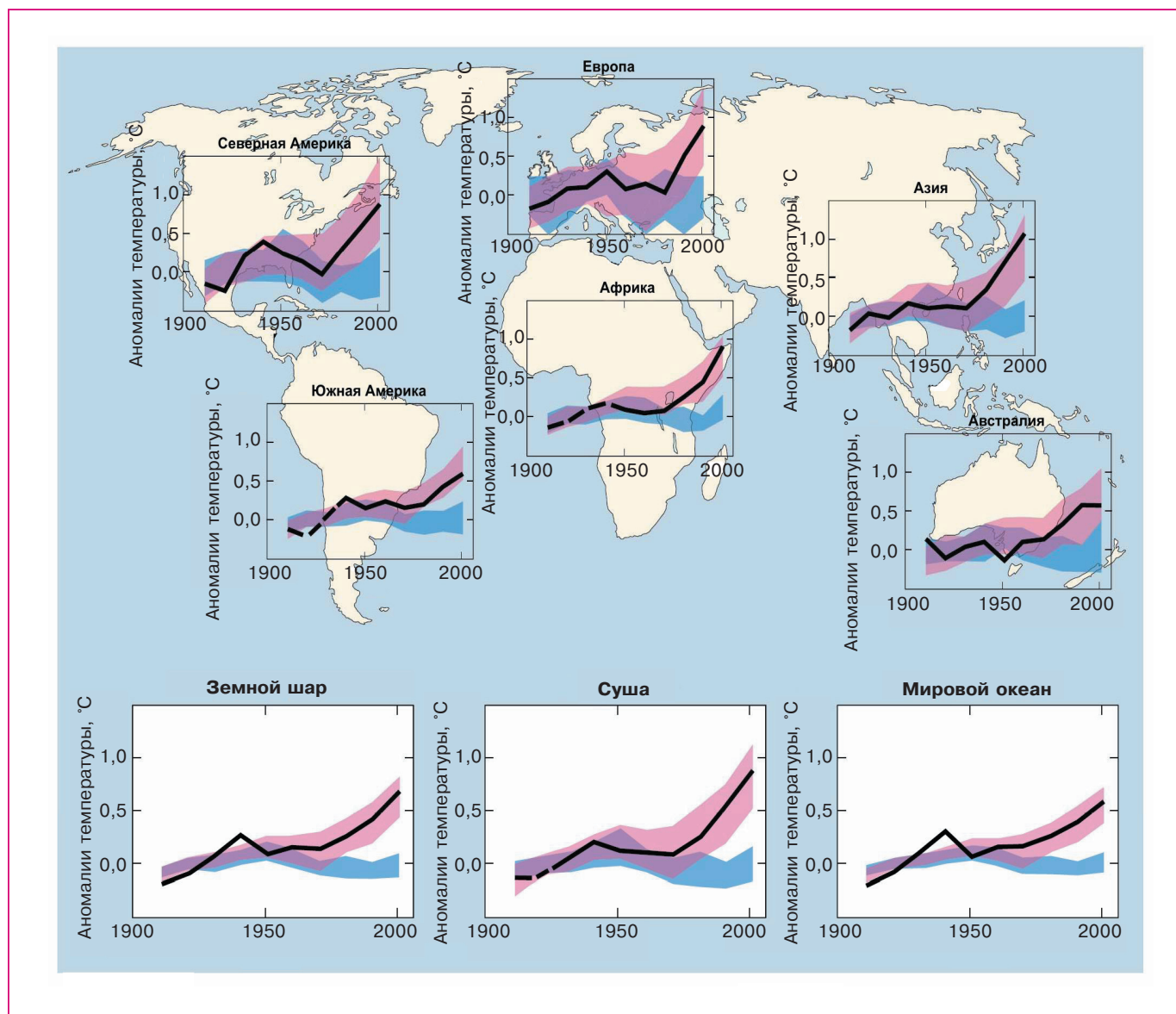


Рис. 6.3. Аномалии средней десятилетней температуры приземного воздуха, рассчитанные для шести континентов и частей света, а также для всего земного шара, поверхности суши и Мирового океана. Аномалии вычислены по отношению к среднему за 1901–1950 гг. Шаг по времени составляет 10 лет. Данным наблюдений на графиках соответствует черная линия. Цветные полосы показывают область, указывающую разброс 90% расчетов с МОЦАО. Красные полосы — расчеты с АЕВ, голубые — расчеты с ЕВ. Прерывистые черные линии показывают десятилетия, когда данных наблюдений имеется значительно меньше, чем в среднем. Рисунок из работы (Hegerl et al., 2007).

антропогенных внешних воздействий рассматривалось увеличение в атмосфере концентраций парниковых газов, а также аэрозолей антропогенной природы, в частности сульфатного аэрозоля. К естественным внешним воздействиям относились изменения концентрации вулканического аэрозоля, а также изменения приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы. Каждому из возможных внешних воздействий на климатическую систему соответствует своя пространственно-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. В частности, анализ, выполненный по результатам расчетов с четырьмя МОЦАО (рис. 6.5), показывает значительный вклад увеличения концентрации парниковых газов в наблюдаемое в течение XX

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

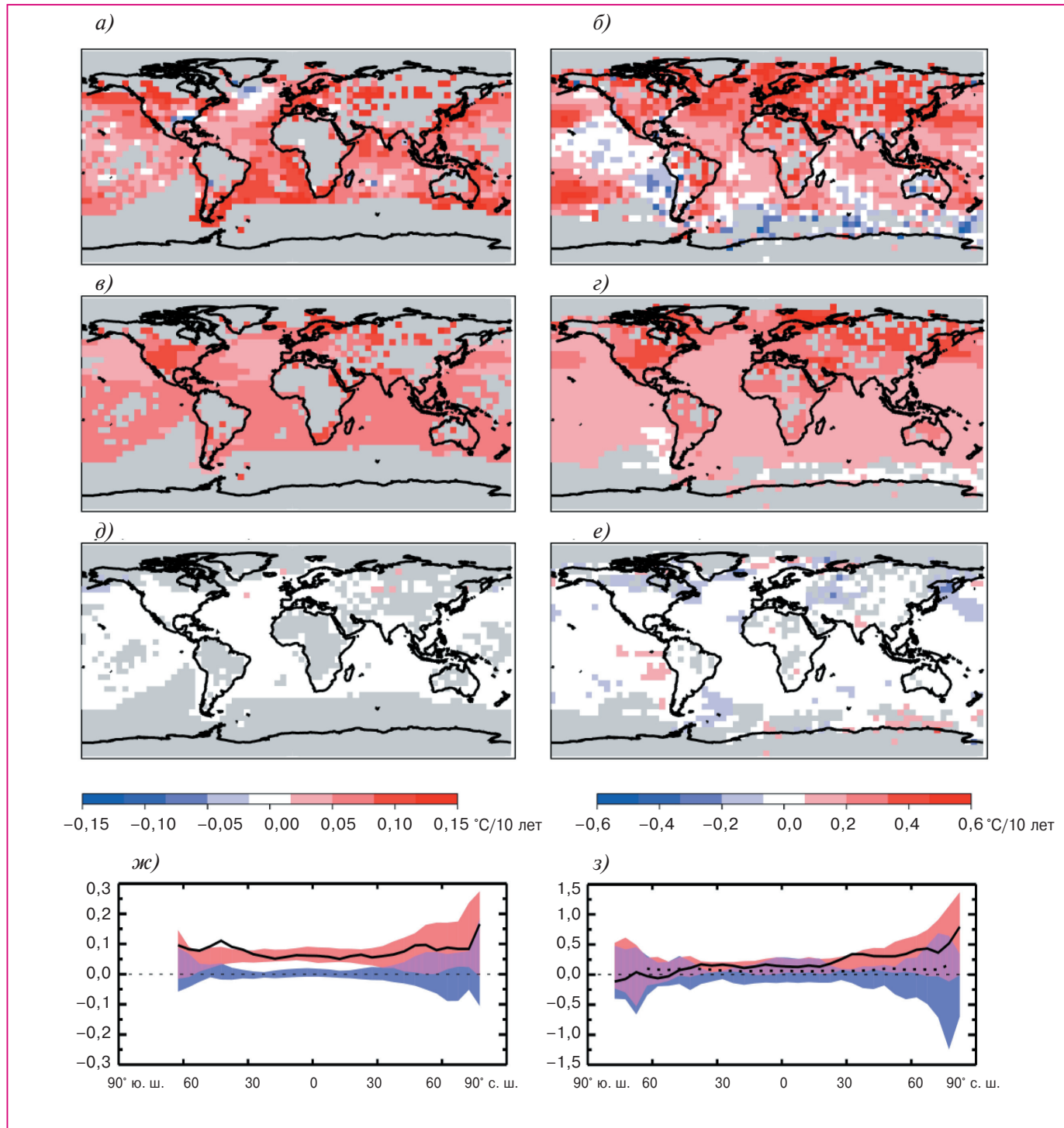


Рис. 6.4. Линейный тренд наблюдаемой и рассчитанной температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за период 1901–2005 гг. (а, в, д, ж) и за период 1979–2005 гг. (б, г, е, з). Заметим, что шкалы для левого и правого столбцов разные. Тренды рассчитывались по данным наблюдений (а, б) и по результатам моделирования с учетом антропогенных и естественных факторов (в, г) и только естественных факторов (д, е). Серым цветом на рисунках выделены области, в которых данных наблюдений в рассматриваемый период оказалось недостаточно для определения трендов. На рисунках (в, г) представлены результаты 58 расчетов по 14 МОЦАО, а на рисунках (д, е) — результаты 19 расчетов по 5 моделям. На рисунках (ж, з) показаны средние зональные линейные тренды температуры приземного воздуха. Наблюдаемым трендам соответствует жирная черная линия. Цветные полосы показывают область, указывающую разброс 90% расчетов с МОЦАО. Красные полосы — расчеты с АЕВ, голубые — расчеты с ЕВ. Рисунок из работы (Hegerl et al., 2007).

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

века потепление. Причем изменения концентрации атмосферного аэрозоля, вызванные хозяйственной деятельностью человека, наоборот, замедляют повышение температуры. Так, по оценкам, полученным с использованием ансамбля из трех моделей, вклад увеличения концентрации парниковых газов в разность наблюдаемой средней глобальной температуры последнего и первого десятилетий XX века составил от 0,8 до 1,1°C, другие воздействия антропогенной природы привели к уменьшению повышения температуры на 0,2–0,4°C, а суммарное влияние всех естественных внешних воздействий было малым (рис. 6.5б, правая колонка). По всем оценкам вклад увеличения концентрации парниковых газов в тренд температуры второй половины XX века был наибольшим (больше наблюдаемого тренда), а остальные внешние воздействия как антропогенной, так и естественной природы только уменьшали повышение температуры (рис. 6.5в). Заметим, однако, что увеличение приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы в последние десятилетия XX века также внесло заметный вклад в повышение приземной температуры (см., например, (Мохов и др., 2006б)), но большая концентрация стратосферного аэрозоля вулканической природы в эти десятилетия в значительной степени его компенсировала. Модельные расчеты показывают, что в XXI веке вклад вариаций солнечной активности в изменения средней глобальной температуры приземного воздуха будет значительно меньше вклада антропогенных воздействий (Мохов и др., 2006в).

Статистический анализ позволяет обнаружить антропогенное влияние не только на температуру приземного воздуха, но и на другие характери-

сти климатической системы, например, на вертикальное распределение температуры атмосферы (Hegerl et al., 2007). Во второй половине XX века по данным высотного зондирования атмосферы наблюдалось повышение температуры тропосферы и ее понижение в стратосфере, что отразилось в увеличении высоты тропопаузы. Результаты статистического анализа показывают, что основными факторами, вызвавшими эти изменения, были увеличение концентрации парниковых газов и уменьшение концентрации стратосферного озона.

Учитывая, что большое беспокойство вызывает возможность антропогенного воздействия на интенсивность и частоту экстремальных климатических явлений, проводятся исследования по обнаружению влияния внешних воздействий на частоту и интенсивность климатических экстремумов. В этих работах используются предложенные недавно стандартизированные индексы экстремумов, которые включают, в частности, среднегодовое число наиболее холодных и теплых дней и ночей, а также соответствующую им температуру и ряд других характеристик. Изменения, происходившие с этими индексами, хорошо согласуются с наблюдаемым потеплением. Статистические методы позволили выделить существенное антропогенное влияние в изменениях некоторых из этих индексов. Кроме того, есть исследования (например, (Stott et al., 2004)), показывающие, что антропогенное влияние может приводить в некоторых регионах к значительному увеличению риска длительных периодов очень высоких температур, например, таких как очень жаркий период летом 2003 г. в Европе.

Значительный интерес представляет анализ влияния антропогенных факторов на атмосферные

Блок 6.2. Пространственно-временные особенности глобального потепления

Значительный интерес представляет не только скорость изменения климата, измеряемая, например, как величина линейного тренда температуры приземного воздуха, но и момент времени, когда то или иное изменение с заданной априори вероятностью можно расценивать как устойчивое, т. е. это изменение сохраняет свою значимость в последующие годы. Дополнительный аргумент в пользу антропогенного вклада в наблюдаемое потепление дает анализ времени наступления устойчивых изменений температуры в разных регионах земного шара, выполненный на основе данных наблюдений и АЕВ расчетов глобального климата XX и XXI веков с помощью ансамбля МОЦАО (Спорышев, Катцов, 2006; Kattsov and Sprogyshev, 2006).

Крупномасштабные особенности распределения модельных и наблюдаемых дат устойчивого изменения температуры приземного воздуха обнаруживают много общего (рис. 6.6). Согласно данным наблюдений и модельным расчетам, устойчивое потепление уже произошло в значительной части регионов земного шара. Причем наблюдаются явные различия во времени наступления устойчивого потепления между тропиками и средними (высокими) широтами Северного полушария. Так, в Индийском и западных частях Тихого и Атлантического океанов отмечаются наиболее ранние (до 1980 г.) даты наступления устойчивого изменения температуры, а в северных акваториях Тихого и Атлантического океанов устойчивое потепление еще не наступило. Качественное подобие наблюдаемой и модельной пространственно-временной структуры температурных изменений также говорит в пользу антропогенной природы наблюдаемого глобального потепления.

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

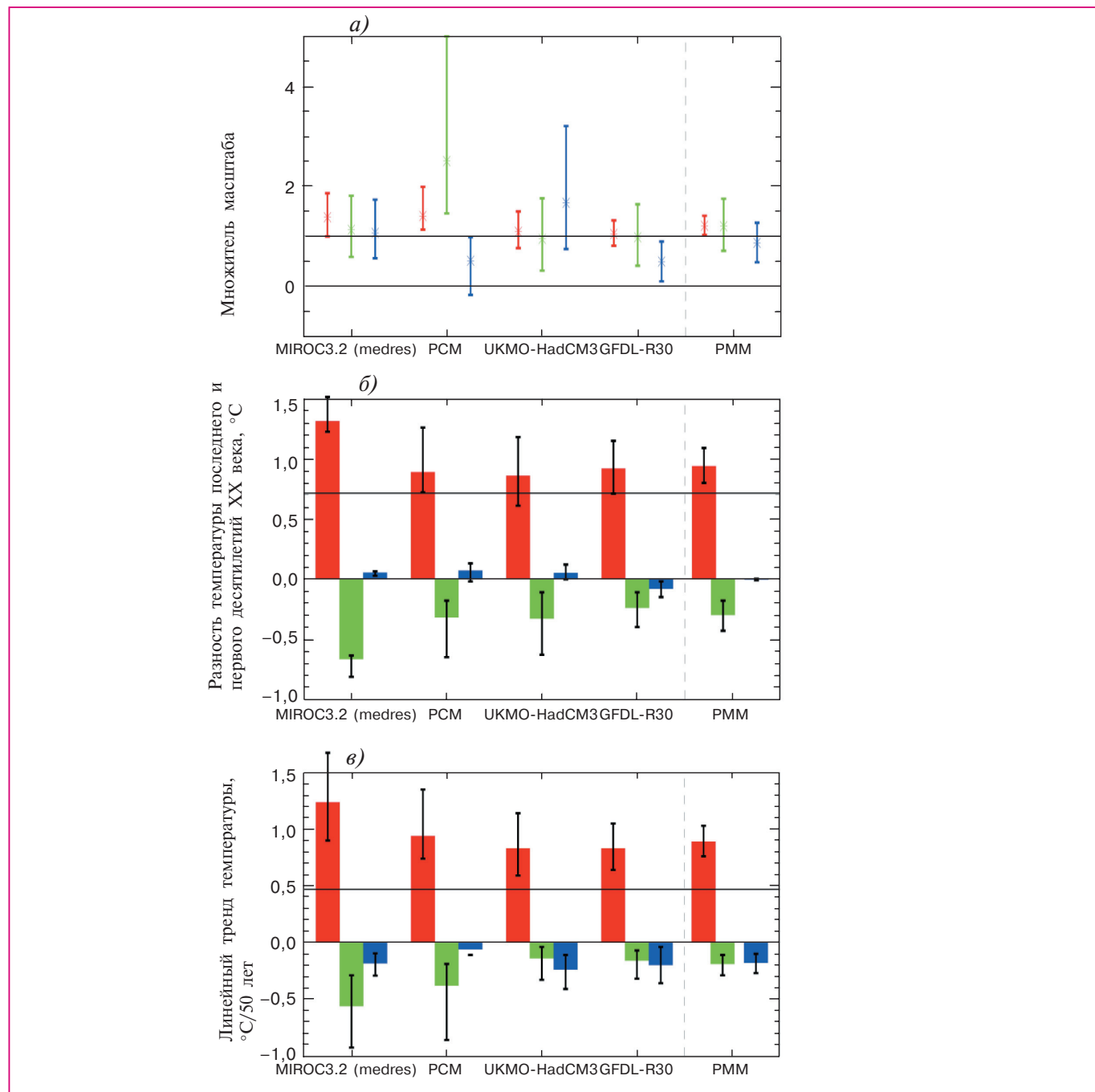


Рис. 6.5. Оценки вклада увеличения концентрации парниковых газов (красный цвет), других воздействий антропогенной природы (зеленый) и естественных внешних воздействий (синий) в наблюдаемое изменение средней глобальной температуры приземного воздуха. Оценки получены методом оптимального обнаружения сигнала (блок 6.1). а) 95%-ные доверительные интервалы для множителей масштаба (безразмерные), полученные для трендов температуры за весь XX век. Множители масштаба показывают, на какую величину должны быть умножены модельные климатические сигналы для получения наилучшего соответствия с данными наблюдений; б) оценки вклада отдельных составляющих в разность средней глобальной температуры за последнее (1990–1999 гг.) и первое (1900–1909 гг.) десятилетия XX века; в) оценки вклада отдельных составляющих в тренд средней глобальной температуры за период 1950–1999 гг. Горизонтальные черные линии на рисунках б) и в) показывают наблюдаемые изменения температуры, а вертикальные отрезки — 95%-ные доверительные интервалы для оценок. Оценки рассчитаны на основе климатических сигналов, полученных в экспериментах с четырьмя МОЦАО: MIROC3.2 (medres), PCM, UKMO-HadCM3 и GFDL-R30. В крайнем правом столбце показаны оценки, полученные по ансамблю из трех моделей (PCM, UKMO-HadCM3 и GFDL-R30) с учетом разброса между моделями (PMM). Рисунок из работы (Hegerl et al., 2007).

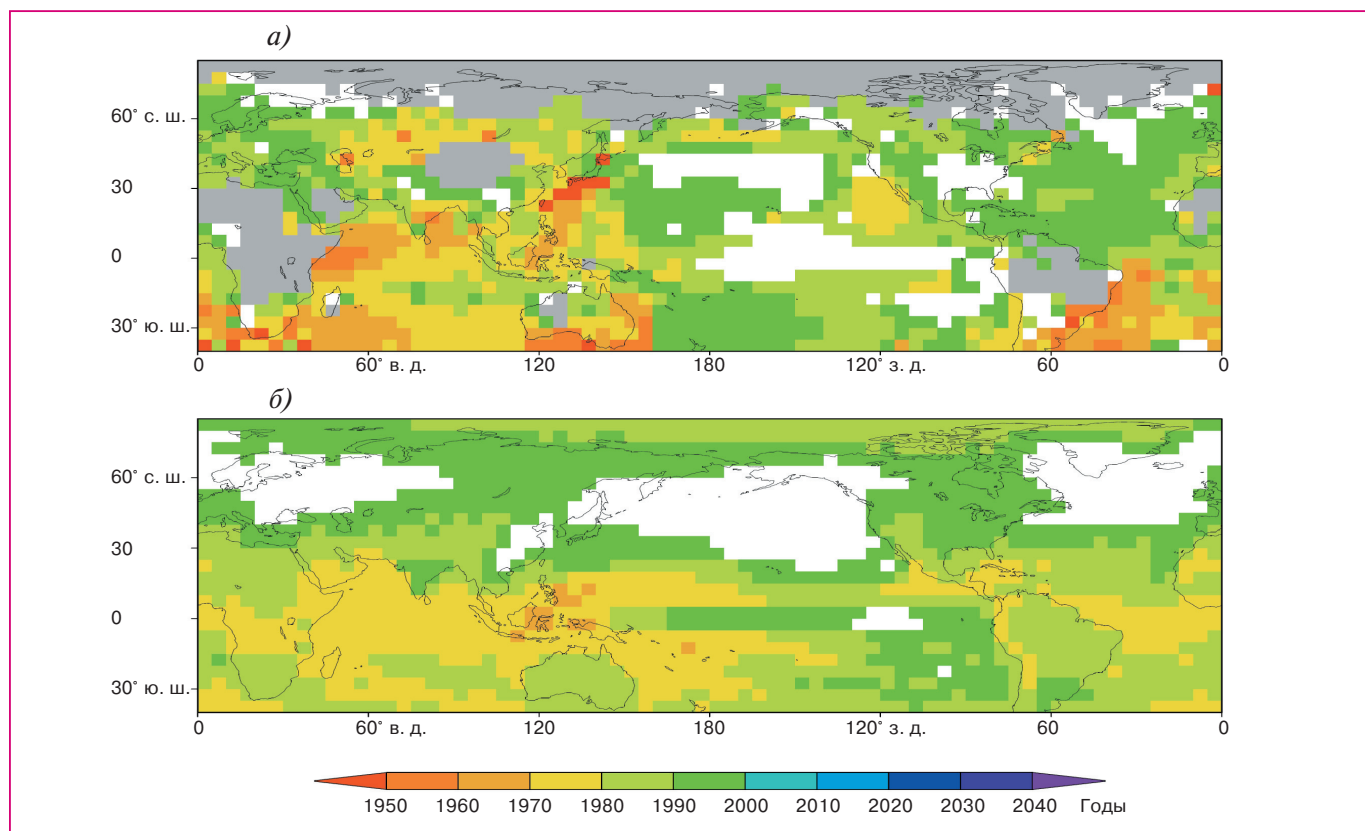


Рис. 6.6. Географическое распределение даты наступления устойчивых изменений температуры приземного воздуха по данным наблюдений (а) и по модельным расчетам (б). Изменения рассматривались по отношению к базовому 50-летнему интервалу (1910–1959 гг.). Белым цветом обозначены области, в которых устойчивое потепление к 2000 г. не достигается, серым цветом выделены области, в которых данных наблюдений оказалось недостаточно для определения времени наступления устойчивого потепления (Спорышев, Катцов, 2006).

осадки. Данные спутниковых микроволновых измерений атмосферного водяного пара над океанами, доступные с 1988 г., показывают статистически значимое увеличение среднего суммарного влагосодержания атмосферы на $1,2 \pm 0,3\%$ за 10 лет, что хорошо согласуется с модельными расчетами и связано с повышением средней температуры тропосферы в результате антропогенного потепления. Однако увеличение общего влагозапаса атмосферы прямо не приводит к увеличению глобальных осадков. Наблюдаемая картина изменения осадков над сушей во второй половине XX века качественно согласуется с модельными расчетами, в которых учитываются и антропогенные, и естественные внешние воздействия, и указывает в среднем на увеличение засушливости. Однако сравнение данных наблюдений с модельными расчетами показывает, что изменения интенсивности муссонных систем и штормов, а также интенсивности осадков в Западной Африке, по крайней мере, отчасти связаны с региональными изменениями температуры поверхности океанов (ТПО). Но если антропогенное влияние на изменения средней глобальной ТПО статистически достаточ-

но надежно устанавливается, то про региональные изменения этого сказать нельзя. Кроме того, изменения количества осадков зависят еще и от пространственной структуры аномалий ТПО и региональных изменений атмосферной циркуляции, что делает идентификацию антропогенного влияния еще более сложной.

Глобальное потепление, в принципе, без учета противодействующих факторов должно приводить к уменьшению толщины и площади морского льда, снежного покрова суши и ледников. Данные наблюдений показывают, что среднегодовая площадь морского льда в Арктике уменьшилась в последние десятилетия, кроме того, ледяной покров стал тоньше. Оценка величины линейного тренда площади морского льда для периода 1980–1999 гг. (-173 тыс. км² за 10 лет), полученная по ансамблю расчетов с современными МОЦАО, оказалась близкой к аналогичной оценке (-189 тыс. км² за 10 лет), полученной по данным наблюдений (Катцов и др., 2007). Причем это уменьшение площади ледяного покрова не согласуется с предположением о его изменениях только под влиянием естественных факторов (Vinnikov et al., 1999; Gregory

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

et al., 2002; Johannessen et al., 2004). Вопрос о влиянии глобального потепления на Арктику подробно обсуждается ниже (блок 6.3). В Южном полушарии уменьшения ледяного покрова по данным наблюдений не зафиксировано.

Площадь снежного покрова в Северном полушарии, по данным спутниковых измерений, за последние 30 лет значительно сократилась. Изменения снежного покрова определяются совместным влиянием изменений температуры и количества выпадающих осадков. Как показал ряд исследований (см. (Hegerl et al., 2007)), основной причиной наблюдаемых в последние десятилетия изменений стало повышение температуры приземного воздуха на равнинах и низменностях. Однако в некоторых областях с очень низкой среднегодовой температурой наблюдалось увеличение толщины снежного покрова, что объясняется увеличением количества осадков. В работе (Павлова и др., 2007) выполнен анализ эволюции снежного покрова в XX веке по ансамблю расчетов с 18 МОЦАО. Модели демонстрируют большой разброс в расчетах площади снежного покрова суши в XX веке, согласуясь в целом в сокращении ее в конце века. Для периода 1980–1999 гг. величина линейного тренда площади снежного покрова Северного полушария для всего ансамбля модельных экспериментов оказалась довольно близкой к соответствующей оценке, полученной по данным наблюдений: соответственно -325 и -396 тыс. км² за 10 лет. Во второй половине XX века наблюдалось также увеличение температуры в верхнем 3-метровом слое почвы, что отразилось в увеличении глубины сезонно-талого слоя в регионах, занимаемых вечной мерзлотой, и в уменьшении глубины сезонно-мерзлого слоя в регионах, где ее нет. Для территории России анализ, выполненный в работе (Павлова и др., 2007), показал хорошее согласование наблюдаемых и модельных трендов глубины промерзания и протаивания.

Полученные по данным наблюдений оценки показывают увеличение общего запаса тепла в Мировом океане на $14,2 \times 10^{22}$ Дж за период с

1961 по 2003 г. (Hansen et al., 2005; Levitus et al., 2005). В конце XX века Мировой океан получил дополнительную энергию, по крайней мере, на порядок больше, чем любой другой компонент климатической системы Земли. Как показывает статистический анализ, основанный на расчетах с двумя МОЦАО (PCM и HadCM3), это увеличение теплозапаса океана нельзя объяснить только естественными внешними воздействиями (например, увеличением приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы) без учета антропогенного влияния. Отметим, что межгодовые отклонения от общего линейного тренда увеличения запаса тепла в модельных расчетах были меньше наблюдаемых, что может быть связано с недостаточностью имеющихся данных наблюдений. Кроме того, в расчетах с современными МОЦАО несколько переоценивается скорость поглощения тепла Мировым океаном. Так, в расчетах, выполненных с восемью МОЦАО, для периода 1961–2003 гг. была получена величина $0,26 \pm 0,06$ Вт/м², тогда как оценка по данным наблюдений составила $0,21 \pm 0,04$ Вт/м². Расхождения могут объясняться как неопределенностями в данных наблюдений, так и тем, что модели переоценивают скорость передачи тепла океаном из верхнего перемешанного слоя в нижележащие слои. Тем не менее наблюдаемая картина изменений температуры Мирового океана на разных глубинах очень хорошо согласуется с предположением о нагревании океана в результате положительного радиационного притока на поверхности. Так, нагрев океана распространяется из верхних слоев в нижние, и тепло проникает глубже в средних и высоких широтах, где сильнее океаническая конвекция.

Таким образом, наблюдается одновременное увеличение запаса энергии всех основных компонентов климатической системы Земли. Причем амплитуда и пространственная структура наблюдаемого потепления разных компонентов хорошо согласуются с ожидаемым по модельным расчетам откликом климатической системы Земли на антропогенное внешнее воздействие.

Блок 6.3. Два эпизода потепления климата в Арктике в XX веке

Установление причин наблюдаемых региональных изменений климата представляет собой серьезную научную проблему: в качестве возможных причин могут выступать как естественная изменчивость, включающая низкочастотные колебания климатической системы, так и потепление климата вследствие антропогенного воздействия. В этом контексте особенно примечательны дискуссии вокруг двух эпизодов потепления в Арктике в XX веке, первое из которых наблюдалось в первой половине XX века; второе, уже превысившее по величине первое, началось в 1970-х годах и продолжается до настоящего времени.

Климат полярных регионов характеризуется большой внутренней изменчивостью, которая может затруднять распознавание в расчетах с МОЦАО даже сравнительно сильного антропогенного сигнала,

характерного для этих регионов. Предлагаются различные механизмы, объясняющие первое арктическое потепление (Delworth and Knutson, 2000; Bengtsson et al., 2004; Johannessen et al., 2004; Overland et al., 2004; Serreze and Francis, 2006), однако не вызывает сомнений, что оно было обусловлено межгодовой (низкочастотной) естественной изменчивостью климатической системы. Во втором потеплении некоторые исследователи также не усматривают ничего, кроме естественной изменчивости, в то время как другие считают, что, по крайней мере, отчасти, это потепление связано с антропогенным воздействием в результате увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере.

Анализ ансамбля экспериментов по модельному воспроизведению эволюции климата XX века, выполненных с МОЦАО СМIP3 с учетом антропогенных и естественных внешних воздействий, показал, что в отдельных экспериментах модели дают зачастую весьма разные внутривековые колебания температуры приземного воздуха в Арктике (Wang et al., 2007). В ряде экспериментов воспроизводятся сравнимые с наблюдаемыми периоды и амплитуды внутривековых колебаний, а в отдельных — и время наступления экстремумов оказывается близким к наблюдаемому. В некоторых случаях близкие к наблюдениям по периоду и времени наступления экстремумов колебания оказываются существенно меньшей амплитуды, причем ни одна из характеристик изменчивости не является устойчивым свойством модели (т. е., например, амплитуда изменчивости может быть разной в разных реализациях одной и той же модели). Некоторые модели систематически занижают собственную изменчивость температуры приземного воздуха.

Обращают на себя внимание качественные различия в поведении членов ансамбля в первые две трети XX века и одновременно качественное сходство между ними в последние его десятилетия. Сопоставление изменчивости в контрольных расчетах (при постоянном внешнем воздействии) с наблюдаемой изменчивостью (в том числе межгодовой и внутривековой) позволяет заключить, что ряд моделей удовлетворительно воспроизводит наблюдаемую естественную изменчивость температуры приземного воздуха в Арктике. Анализ позволил установить, что ни у одной модели в контрольных реализациях (т. е. в отсутствие изменений во внешнем воздействии) нет доминирующих временных масштабов.

В XX веке на фоне векового сокращения площади арктических льдов в работе (Захаров, 2004) выделяются четыре внутривековые стадии эволюции морского льда в Северном Ледовитом океане: две стадии увеличения (1900–1918 гг. и 1938–1968 гг.) и две стадии сокращения ледяного покрова (1918–1938 гг. и 1968–1999 гг.). Тенденция сокращения сохранилась и в начале XXI века. В работе (Захаров, 2004) дается оценка линейного тренда площади льда в XX веке, составляющая $-55,5$ тыс. км²/10 лет. При этом положительные тренды 1900–1918 гг. и 1939–1968 гг. составляют соответственно 169 и 25 тыс. км²/10 лет, а отрицательные тренды 1918–1939 гг. и 1968–1999 гг. соответственно -200 и -121 тыс. км²/10 лет. Сравнение этих оценок с модельными данными представляет значительный интерес (Катцов и др., 2007). МОЦАО демонстрируют большой разброс в расчетах динамики площади ледяного покрова океана в Северном полушарии, согласуясь в целом в сокращении ее к концу XX века. Это относится как к разным моделям, так и к разным членам ансамбля расчетов с одной и той же моделью. Примечательно, что значения трендов для всей совокупности модельных данных оказываются сопоставимыми с соответствующими оценками Захарова: $-47,5$ тыс. км²/10 лет (против $-55,5$ тыс. км²/10 лет (Захаров, 2004)) для всего XX века и -178 тыс. км²/10 лет (против -121 тыс. км²/10 лет (Захаров, 2004)) для 1968–1999 гг. Учитывая неопределенность относительного вклада долгопериодной естественной изменчивости во второе арктическое потепление, полученное согласие трендов можно расценивать как весьма обнадеживающее. Как и следовало ожидать, в остальные три периода, выделенные Захаровым в XX веке, линейные тренды, полученные в различных членах ансамбля, не согласуются не только в абсолютном значении, но и в знаке. Все вышеизложенное подтверждает вывод о доминирующей роли естественной изменчивости климатической системы в эволюции площади морского льда в Северном полушарии, по крайней мере, в первые две трети XX века. В ряде работ, где рассматривалась эволюция других климатических характеристик, в частности атмосферных осадков (Kattsov et al., 2007) и радиационных потоков (Sorteberg et al., 2007), получены близкие результаты.

Способность ряда МОЦАО СМIP3 удовлетворительно воспроизводить связанные с изменениями внешнего воздействия тренды ряда климатических характеристик в Арктике, а также соответствующую внутривековую изменчивость повышает доверие к оценкам будущих изменений климата, полученным с помощью указанных моделей. Сходство между расчетами первого арктического потепления и контрольными экспериментами, а также качественное различие между поведением членов ансамбля в первой и второй половинах XX века можно расценивать как подтверждение различия причин, стоящих за двумя эпизодами потепления в Арктике в XX веке.

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

6.3. Обнаружение антропогенного потепления на территории России

Данные наблюдений за климатом России, подробно рассмотренные в главе 3, показывают на устойчивое повышение температуры приземного воздуха, начавшееся с середины 1970-х годов. Возникает вопрос, можно ли считать антропогенный фактор главной причиной этого потепления? Сомнения часто основываются на фактах несоответствия географического распределения наблюдаемых изменений температуры приземного воздуха на территории России и соответствующего распределения, которое получается по расчетам моделей климата в результате учета увеличения содержания парниковых газов в атмосфере.

Действительно, в большинстве случаев расчеты указывают на увеличение интенсивности потепления к северу, в то время как наблюдения этого не показывают (рис. 3.6). Более того, зимой в некоторых районах на севере России в конце XX — начале XXI веков отмечалось похолодание. Подробный анализ материалов сравнения данных температуры за 1980–2006 гг. по наблюдениям и расчетам 16 МОЦАО СМIP3 для территории России (Мелешко и др., 2007) показывает, что локальные изменения температуры, оцениваемые за периоды времени 25–30 лет как по данным наблюдений, так и по результатам единичных модельных расчетов, являются неустойчивыми по причине значительного вклада естественной климатической изменчивости. Вели-

чина сигнала антропогенного увеличения температуры на таком коротком временном отрезке еще мала по сравнению с локальной естественной климатической изменчивостью. Поэтому сопоставление оценок изменения температуры в пунктах или небольших по площади регионах не может дать статистически значимый результат. При осреднении расчетов по ансамблю МОЦАО значительная доля естественной изменчивости фильтруется. Однако наблюдаемый ряд всегда единственен, и эффективная фильтрация естественной изменчивости возможна только на основе пространственно-временного сглаживания. При этом пространственные масштабы рассматриваемых территорий должны существенно превышать радиус корреляции аномалий температуры (сопоставимый с масштабами континентов). Размеры территории России позволяют выполнить сравнение наблюдаемых и рассчитанных изменений температуры приземного воздуха, осредненных по всей территории России.

С целью обнаружения сигнала антропогенного повышения температуры выполнено сравнение ее годовых и сезонных аномалий, средних для России, по данным наблюдений и результатам расчетов по ансамблю МОЦАО СМIP3 (Мелешко и др., 2007). Рассмотрены две серии экспериментов — в первой из них учитывались и антропогенные, и естественные внешние воздействия, а во второй — только естественные воздействия. Анализ временного хода годовых (рис. 6.7) и сезонных аномалий температуры показывает, что наблюдаемый тренд ее повыше-

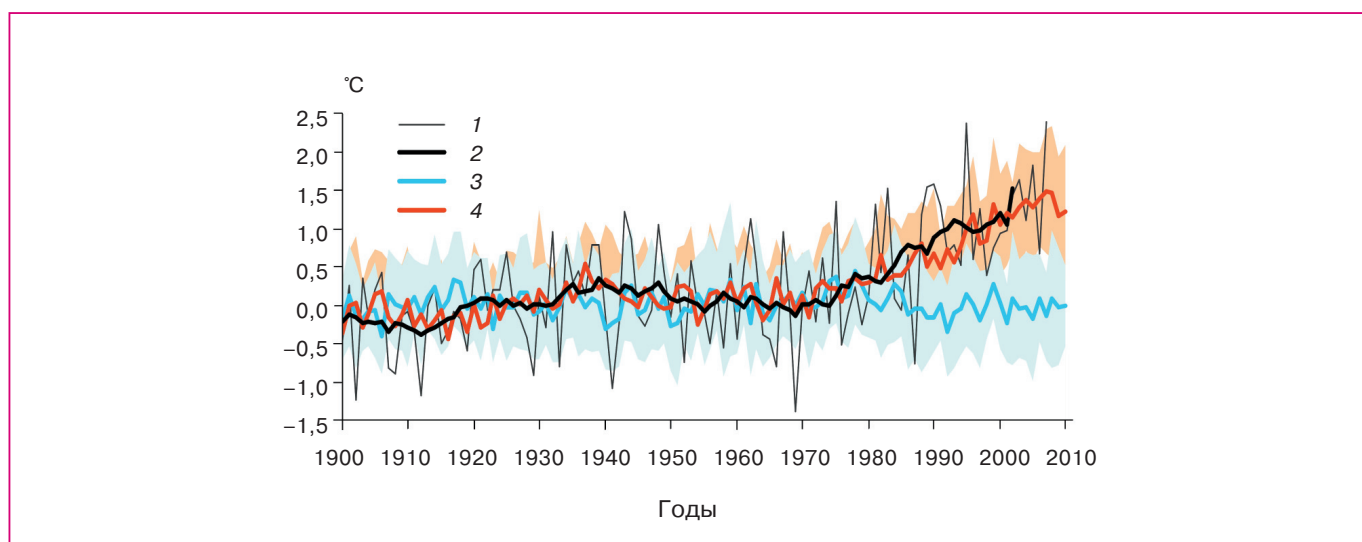


Рис. 6.7. Временной ход среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха на территории России по данным наблюдений (1, 2) и по ансамблю 16 МОЦАО СМIP3 с учетом только естественных внешних воздействий (3), антропогенных и естественных воздействий (4). Аномалии рассчитаны по отношению к среднему за 1901–1950 гг. Кривая 2 получена из 1 с помощью 11-летнего скользящего осреднения. Цветные заштрихованные области показывают разброс на соответствующие стандартные отклонения ($\pm\sigma$) от средних по ансамблю.

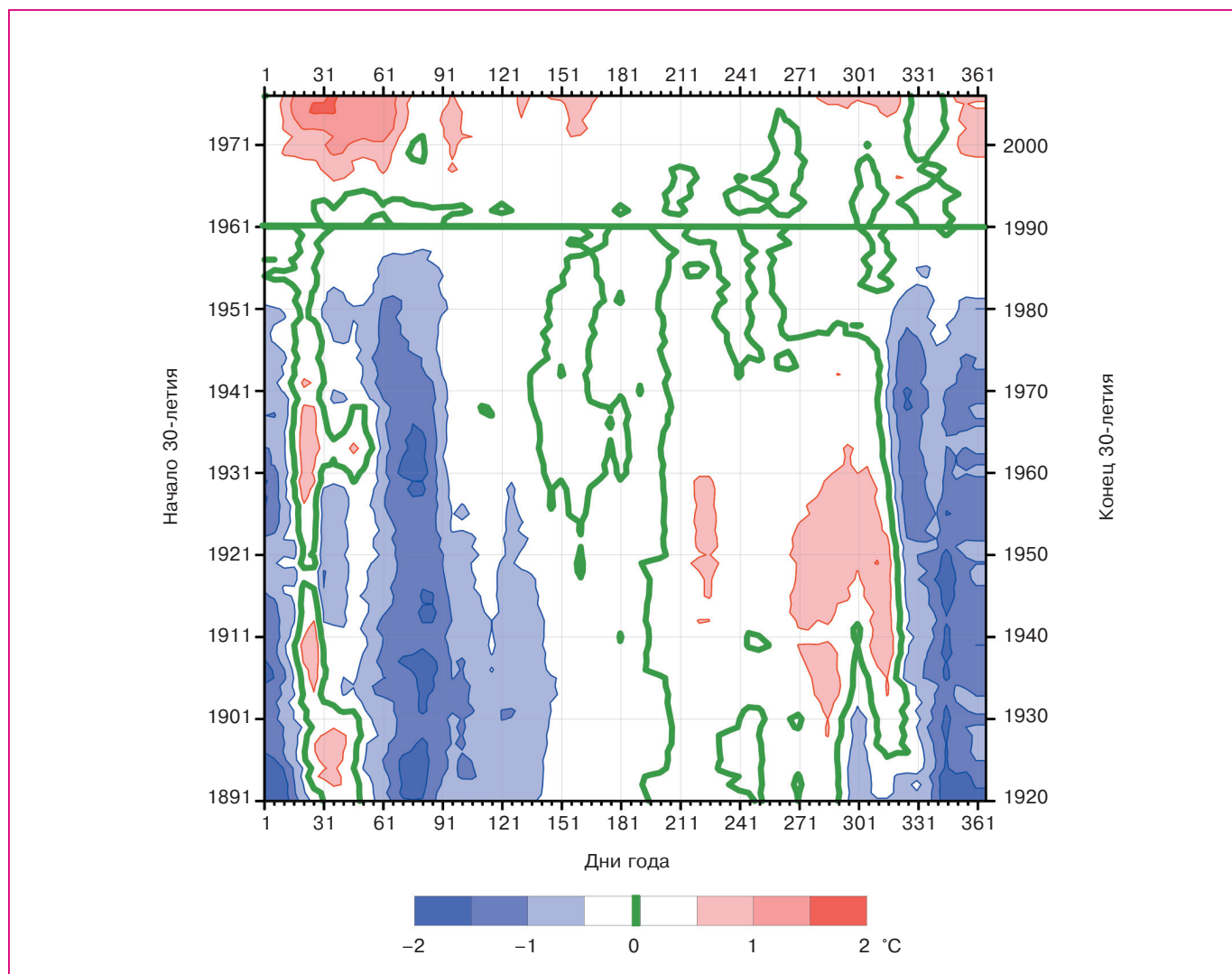


Рис. 6.8. Сезонное распределение скользящих 15-дневных аномалий приземной температуры воздуха (°C) на территории России, осредненных по скользящим 30-летиям для периода 1891–2006 гг. За базовый принят период 1961–1990 гг.

ния невозможно объяснить без учета антропогенного фактора. С другой стороны, рис. 6.7 показывает очень хорошее соответствие наблюдаемой с конца 1970-х годов скорости повышения температуры воздуха и результатов расчета по ансамблю МО-ЦАО, учитывающих антропогенное увеличение содержания парниковых газов в атмосфере. По тем и другим данным, тренд средней годовой температуры воздуха составляет около $0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет. Такой результат позволяет сделать вывод, что наблюдаемый на территории России тренд повышения температуры, весьма вероятно, во многом объясняется увеличением концентрации парниковых газов и аэрозоля в атмосфере.

Полученная по ансамблю моделей аппроксимация тренда антропогенной составляющей температуры позволяет оценить ее вклад в суммарную изменчивость наблюдаемой температуры в целом для территории России. Для этого рас-

смотрена регрессия исходного (несглаженного) ряда температуры воздуха с использованием в качестве независимой переменной не времени, а аппроксимации хода средних ансамблевых аномалий (Мелешко и др., 2007). Расчеты показали, что для периода 1970–2006 гг. вклад антропогенного фактора составляет около 30%, соответственно отношение сигнала к шуму равно примерно 0,4. Заметим, что по данным, приведенным в главе 3, доля суммарной дисперсии средней годовой температуры для России, объясняемой линейным трендом, в период 1976–2006 гг. составила 28%. Близость оценок вкладов линейного временного тренда и его антропогенной составляющей может рассматриваться в качестве веского аргумента в пользу того, что главным фактором наблюдаемого во второй половине XX века в России повышения температуры приземного воздуха является антропогенный фактор.

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

В первой половине XX века антропогенное воздействие на климатическую систему Земли было невелико, и потепление на территории России в этот период, по-видимому, объясняется естественными причинами. Анализ наблюдений за температурой воздуха на сети российских климатических станций показывает существенно различное сезонное распределение аномалий температуры в первой половине и конце XX века. В 1930-е годы повышение температуры воздуха на территории России наблюдалось преимущественно в осенний сезон (август — ноябрь), в то время как современное потепление происходит в зимние и весенние месяцы (рис. 6.8). Все это указывает на различие причин повышения температуры в каждом из периодов.

6.4. Антропогенное потепление климата и альтернативные гипотезы

Основным фактором, приводившим к изменениям климата в прошлом, являлись изменения радиационного баланса системы атмосфера — поверхность земли. Однако причины, вызывавшие изменения радиационного баланса в разное время, были разными. В последние годы достигнуты определенные успехи в понимании этих причин и основных механизмов, способствующих усилению первоначально возникших изменений. Многие особенности изменений климата прошлого могут быть воспроизведены с большой степенью достоверности с помощью современных физико-математических моделей. Существует три фундаментальные причины, почему может меняться радиационный баланс земного шара, вызывая тем самым изменения климата (Jansen et al., 2007):

— изменения орбитальных параметров Земли или изменения поступающего на верхнюю границу атмосферы потока солнечной радиации;

— изменения доли солнечной радиации, которая отражается в мировое пространство. Эта доля (альбедо) может меняться в результате изменений облачности, концентрации атмосферного аэрозоля или отражательных свойств подстилающей поверхности;

— изменения потока длинноволновой радиации, уходящего в мировое пространство, в результате изменения концентраций парниковых газов в атмосфере.

В прошлом происходили значительные изменения климата Земли. Холодные ледниковые эпохи сменялись относительно теплыми межледниковьями. Существуют убедительные свидетельства того, что ледниковые эпохи в течение последних примерно 3 млн. лет начинались и заканчивались, подчиняясь трем достаточно регулярным циклам,

каждый из которых связан с определенным астрономическим эффектом, влияющим на движение Земли вокруг Солнца, а именно, с прецессией, нутацией и изменением формы орбиты Земли. Эти циклы, часто называемые циклами Миланковича, изменяют количество солнечной радиации, получаемой на каждой широте в каждом сезоне. Однако при этом практически сохраняется среднее за год глобальное количество солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы.

Для начала оледенения критическое значение имеет величина солнечной радиации, получаемая континентами Северного полушария летом. Если эта величина существенно уменьшается из-за астрономических факторов, то на континентах будет таять меньше снега в весенне-летний период и площадь снежного покрова начнет постепенно увеличиваться. Поскольку отражательная способность снега большая, то при увеличении площади снежного покрова величина поглощаемой поверхностью солнечной радиации еще больше уменьшается, и это ведет к дальнейшему распространению ледников. В нормальной ситуации астрономические факторы, связанные с циклами Миланковича, действуют разнонаправленно, и поэтому их суммарное влияние невелико. Ледниковые эпохи наступают, когда все три фактора действуют в одном направлении, тогда их эффекты складываются и приводят к значительному уменьшению приходящей радиации в высоких широтах. Так, началу последней ледниковой эпохи (около 116 тысяч лет назад) соответствовало уменьшение приходящей солнечной радиации на 65° с. ш. в середине июня примерно на 40 Вт/м^2 по сравнению с современным значением (Petit et al., 1999; Jansen et al., 2007). Астрономические параметры движения Земли рассчитываются с достаточно высокой точностью на тысячелетия вперед. Выполненные расчеты с климатическими моделями промежуточной сложности, учитывающими астрономические параметры, показывают, что в ближайшие тысячелетия возникновения предпосылок для начала новой ледниковой эпохи не предвидится, и она по естественным причинам не начнется, по крайней мере в ближайшие 30 тысяч лет (Berger and Loutre, 2002). В ОД4 достоверность этого результата оценивается как очень высокая (вероятность больше 90%).

Содержание CO_2 в атмосфере также играло важную роль в изменениях температуры в прошлом. Согласно данным ледниковых кернов в Антарктике, концентрация CO_2 в атмосфере в ледниковые периоды была относительно малой ($\sim 190 \text{ млн}^{-1}$) и большой ($\sim 280 \text{ млн}^{-1}$) в теплые межледниковья. Более того, изменения концентрации CO_2 следовали за изменениями температуры с запаздыванием в несколько сотен лет. Поскольку из-

менения климата между началом и концом ледниковой эпохи охватывают период в несколько тысяч лет, то на изменения температуры также оказывала влияние положительная обратная связь с содержанием CO_2 в атмосфере. Это означает, что начальное похолодание при оледенении усиливалось с уменьшением концентрации CO_2 в атмосфере в результате естественного изменения газообмена между атмосферой, океаном и биосферой. Расчеты также показывают, что температурный режим ледниковых эпох правильно воспроизводится климатическими моделями только в том случае, когда, помимо изменения астрономических параметров орбиты Земли, также учитываются указанные изменения содержания CO_2 в атмосфере.

Что же касается периода инструментальных наблюдений, то результаты совместного анализа наблюдений и расчетов, выполненных с помощью сложных физико-математических моделей климата, дают согласованную картину потепления и позволяют сделать следующие выводы (Trenberth et al., 2007):

- крайне маловероятно (< 5%), что изменения климата, наблюдавшиеся за последние 50 лет, происходили без внешнего воздействия;

- с высокой степенью вероятности (> 90%) можно утверждать, что наблюдаемое увеличение концентраций антропогенных парниковых газов обуславливает большую часть глобального потепления, начиная с середины XX века.

Вместе с тем продолжают высказываться сомнения по поводу антропогенной природы глобального потепления. Выдвигаются различные альтернативные гипотезы, как правило, не имеющие необходимого научного обоснования, но активно обсуждаемые в средствах массовой информации. В числе прочих часто упоминается гипотеза о доминирующей роли солнечной активности в наблюдаемом глобальном потеплении. Так, например, утверждается, что вследствие изменения светимости Солнца в ближайшие годы следует ожидать понижения глобальной температуры. С другой стороны, непрерывные наблюдения за Солнцем в течение 28 лет показывают, что колебания потока солнечной радиации между максимумом и минимумом в 11-летнем цикле составляют 0,08% при отсутствии заметного долговременного тренда (Forster et al., 2007). Прямое радиационное воздействие на глобальную атмосферу в результате изменений солнечного потока с 1750 г. по настоящее время составляет 0,12 Вт/м² (90%-ный доверительный интервал: от 0,06 до 0,30 Вт/м²), тогда как суммарное радиационное воздействие хозяйственной деятельности равно 1,6 Вт/м² (90%-ный доверительный интервал: от 0,6 до 2,4 Вт/м²). Дополнительное не прямое радиационное воздействие вариаций солнечной активности, в

частности вследствие влияния солнечной активности на концентрацию стратосферного озона и на поток космических лучей в земной атмосфере, слабо изучено, но в ОД4 также оценивается как малое. Таким образом, величина полного влияния солнечной активности значительно меньше суммарного воздействия ПГ и аэрозоля, вызванного хозяйственной деятельностью человека. Поэтому согласно ОД4 нет оснований рассматривать изменения солнечной активности и связанные с ней изменения потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы как причину наблюдаемого потепления климата.

Существуют и другие предположения, согласно которым нынешнее потепление климата является проявлением долгопериодной естественной изменчивости. Как известно, в течение XX века в высоких и средних широтах Северного полушария наблюдались два теплых периода: первый начался с середины 1920-х и продолжался до 1940-х годов, а второй с 1980-х годов и продолжается по настоящее время (блок 6.3). На этом основании высказывается предположение, что период наиболее значительного потепления в конце XX столетия приходится на восходящую ветвь 50–60-летнего естественного колебания (Polyakov et al., 2002; Гудкович и др., 2005) или связан с квазипериодическим внешним воздействием (Даценко и др., 2004). Однако отсутствие надежных инструментальных измерений в Арктике длительностью не менее столетия не позволяет достаточно ясно понять физическую природу этих естественных колебаний и установить более определенно их периодичность. Что касается утверждений о влиянии внешних естественных воздействий на климат (влияние других планет Солнечной системы и т. п.), то в настоящее время не существует убедительных данных наблюдений, которые бы показывали, что эти воздействия по своей величине сопоставимы с радиационным воздействием, вызванным изменениями концентраций ПГ в атмосфере.

Поскольку водяной пар является также важным парниковым газом, в некоторых обсуждениях (см., например, (ПКП, 2006)) отмечается, что выбросы в атмосферу дополнительного количества воды, связанного с хозяйственной деятельностью, могут влиять на изменения климата. Согласно докладу ОД4, использование воды в хозяйственной деятельности составляет 1% количества водяного пара, поступающего в атмосферу от всех естественных источников. Из этого количества 70% используется в различных ирригационных проектах. Расчеты с глобальными моделями атмосферы показывают, что в Азии, где реализуется большинство проектов по орошению, изменения содержания водяного пара в тропосфере на 1% вызывают

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

изменения глобального радиационного воздействия на $0,03 \text{ Вт/м}^2$. Согласно региональным исследованиям, орошение вызывает преимущественно понижение температуры приземного воздуха в результате испарения, но не приводит к парниковому эффекту. Оно также может оказывать влияние на облачность и осадки регионального масштаба (Boucher et al., 2004). В некоторых исследованиях также показано уменьшение потока водяного пара в атмосферу при вырубке лесов, особенно в тропической зоне (Gordon et al., 2005).

Другой вопрос, который иногда поднимается, касается роли в изменении климата тепла, которое выбрасывается в атмосферу крупными городами и промышленными центрами. Как известно, образование островов тепла в городах и мегаполисах вызвано как физическими особенностями городского ландшафта, так и выбросами тепла в окружающую среду в результате хозяйственной деятельности (отопление зданий, использование разного энергетического оборудования, транспорта). Согласно некоторым оценкам, суммарный глобальный поток тепла в атмосферу от этих источников равен $0,03 \text{ Вт/м}^2$ (Nakićenović, 1998).

Само по себе нынешнее глобальное потепление не вызвало бы особой тревоги, если бы не было связано с увеличением концентрации парниковых газов. Но именно антропогенное увеличение концентрации парниковых газов вызывает наибольшую озабоченность в долгосрочной перспективе, поскольку заблаговременно предупреждает о беспрецедентном повышении глобальной температуры уже в нынешнем столетии со всеми вытекающими последствиями.

Наряду с убедительными научными свидетельствами, показывающими, что хозяйственная деятельность вызывает изменения климата, и в ближайшие десятилетия эти изменения неотвратимы, существуют неопределенности количественных оценок возможных региональных изменений климата и особенно изменений повторяемости и интенсивности аномальных режимов в атмосфере и в океане. Как известно, современные физико-математические модели имеют систематические погрешности, вызываемые недостаточным пространственным разрешением, неточностями описания некоторых важных физических процессов и значимых обратных связей, которые определяют чувствительность климата к внешним воздействиям. Несмотря на указанные неопределенности, все без исключения модели предсказывают потепление глобального климата с ростом концентрации парниковых газов.

6.5. Выводы

В пользу антропогенной природы наблюдаемого потепления убедительно свидетельствует сравнение данных наблюдений и результатов двух серий модельных расчетов эволюции климата XX века, где в первой серии учитывались и антропогенные, и естественные внешние воздействия на климатическую систему Земли, а во второй 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 учитываются, температура в последние десятилетия XX века понижается. Для больших территорий, в частности для всех континентов (за исключением Антарктиды) и для территории России, эволюция среднегодовой температуры приземного воздуха на протяжении XX века, полученная по ансамблю модельных расчетов при учете антропогенных и естественных внешних воздействий, довольно хорошо согласуется с наблюдаемой. Причем в последние десятилетия согласие модельных расчетов с данными наблюдений особенно хорошее.

Выполненные недавно исследования, использующие формальные статистические методы для выделения вклада отдельных внешних воздействий в наблюдаемое глобальное потепление, показали, что вклад увеличения концентрации парниковых газов в тренд температуры во второй половине XX века был наибольшим (больше наблюдаемого тренда), а суммарное воздействие всех остальных факторов только ослабляло повышение температуры. Статистический анализ позволил также обнаружить антропогенное влияние не только на температуру приземного воздуха, но и на другие характеристики климатической системы, в частности на вертикальный профиль температуры атмосферы, на частоту и интенсивность климатических экстремумов, а также на изменение теплозапаса Мирового океана.

В последние десятилетия в Северном полушарии сокращается площадь снежного покрова и площадь морского льда в Арктике. Кроме того, по данным наблюдений на территории России увеличивается температура верхнего 3-метрового слоя почвы, что отразилось в увеличении глубины сезонно-талого слоя в регионах, занимаемых многолетней мерзлотой, и в уменьшении глубины сезонно-мерзлого слоя в регионах, где ее нет. Все указанные изменения достаточно хорошо воспроизводятся в модельных расчетах, учитывающих антропогенные и естественные внешние воздействия.

Таким образом, в последние десятилетия наблюдается одновременное увеличение запаса энергии всех основных компонентов климатической системы Земли. Причем амплитуда и пространственная структура наблюдаемого потепления в разных компонентах соответствуют ожидаемому по модельным расчетам отклику климатической системы Земли на антропогенное внешнее воздействие.

Расчеты, учитывающие изменения астрономических параметров движения Земли, показывают, что в ближайшие тысячелетия возникновение предпосылок для начала новой ледниковой эпохи не предвидится, и она по естественным причинам не начнется, по крайней мере в ближайшие несколько тысяч лет.

Согласно ОД4 нет оснований рассматривать изменения солнечной активности и связанные с нею изменения потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы как причину наблюдаемого потепления климата.

Гипотезы о доминирующей роли других естественных климатических факторов в наблюдаемых изменениях температуры, в частности предположение, что нынешнее потепление климата является проявлением долгопериодной естественной изменчивости, не находят надежных научных подтверждений.

Наряду с убедительными научными свидетельствами, показывающими, что хозяйственная деятельность вызывает изменения климата, существуют неопределенности при оценках возможных региональных изменений климата и особенно изменений повторяемости и интенсивности аномальных режимов в атмосфере и в океане. Для дальнейшего уточнения оценок требуются усилия мирового научного сообщества по совершенствованию современных МОЦАО и РКМ, а также методов анализа результатов моделирования.

6.6. Литература

- Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 2004.** Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 50–66.
- Гудкович З. М., Карклин В. П., Фролов И. Е., 2005.** Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова евразийских арктических морей и их возможные причины, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 5–14.
- Дацинко Н. М., Монин А. С., Сонечкин Д. М., 2004.** О колебаниях глобального климата за последние 150 лет, *Доклады РАН*, т. 399, № 2, с. 253–256.
- Захаров В. Ф., 2004.** Изменение состояния морских арктических льдов, в кн.: *Формирование и динамика современного климата Арктики*, Алексеев Г. В. (ред.), СПб, Гидрометеоздат.
- Катцов В. М., Алексеев Г. В., Павлова Т. В., Спорышев П. В., Бекряев Р. В., Говоркова В. А., 2007.** Моделирование эволюции ледяного покрова Мирового океана в XX и XXI веках, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 43, № 2, с. 165–181.
- Мелешко В. П., Мирвис В. М., Говоркова В. А., 2007.** Насколько наблюдаемое потепление климата России согласуется с расчетами по объединенным моделям общей циркуляции атмосферы и океана?, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 5–19.
- Мохов И. И., Карпенко А. А., Стотт П. А., 2006а.** Наибольшие скорости регионального потепления климата в последние десятилетия с оценкой роли естественных и антропогенных причин, *Доклады РАН, сер. Геофиз.*, т. 406, № 4, с. 538–543.
- Мохов И. И., Безверхний В. А., Елисеев А. В., Карпенко А. А., 2006б.** Взаимосвязь изменений глобальной приповерхностной температуры с изменениями солнечной активности по данным наблюдений и реконструкций для XVII–XX веков и по модельным расчетам, *Доклады РАН, сер. Геофиз.*, т. 409, № 1, с. 115–119.
- Мохов И. И., Безверхний В. А., Елисеев А. В., Карпенко А. А., 2006в.** Модельные оценки глобальных климатических изменений в XXI веке с учетом различных сценариев вариаций солнечной активности, *Доклады РАН, сер. Геофиз.*, т. 411, № 2, с. 250–253.
- Павлова Т. В., Катцов В. М., Надежина Е. Д., Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2007.** Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения, *Криосфера Земли*, т. 11, № 2, с. 3–13.
- ПКП, 2006.** Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий: Проблема Киотского протокола, *Материалы Совета-семинара при Президенте Российской академии наук*, М., Наука, 408 с.
- Спорышев П. В., Катцов В. М., 2006.** Пространственно-временные особенности глобального потепления, *Доклады РАН, сер. Геофиз.*, т. 410, № 4, с. 532–537.
- Allen M. R. and Tett S. F. B., 1999.** Checking for model consistency in optimal fingerprinting, *Climate Dynamics*, vol. 15, pp. 419–434.
- Bengtsson L., Semenov V., and Johannessen O. M., 2004.** The early 20th century warming in the Arctic — a possible mechanism, *J. Climate*, vol. 17, pp. 4045–4057.

6. АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

- Betts R. A. and Best M. J., 2004.** Relative Impact of Radiative Forcing, Landscape Effects and Local Heat Sources on Simulated Climate Change in Urban Areas, BETWIXT Technical Briefing Note No. 6, Met. Office, Exeter, UK, 15 p.
- Boucher O., Myhre G., and Myhre A., 2004.** Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapor and climate, *Climate Dynamics*, vol. 22, pp. 597–604.
- Broccoli A. J., Dixon K. W., Delworth T. L., Knutson T. R., Stouffer R. J., and Zeng F., 2003.** Twentieth-century temperature and precipitation trends in ensemble climate simulations including natural and anthropogenic forcing, *J. Geophys. Res.*, vol. 108(D24), 4798 p., doi:10.1029/2003JD003812.
- Crutzen P. J., 2004.** New directions: The growing urban heat and pollution “islands” effect — impact on chemistry and climate, *Atmos. Environ.*, vol. 38, pp. 3539–3540.
- Delworth T. L. and Knutson T. R., 2000.** Simulation of early 20th century global warming, *Science*, vol. 287(5461), pp. 2246–2250.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D. W., Haywood J., Lean J., Lowe D. C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., and Van Dorland R., 2007.** Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, 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., and Miller H. L. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Gordon L. J., Steffen W., Jonsson B. F., Folke C., Falkenmark M., and Johannessen A., 2005.** Human modification of global water vapor flows from the land surface, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, vol. 102, pp. 7612–7617.
- Gregory J. M., Stott P. A., Cresswell D. J., Rayner N. A., Gordon C., and Sexton D. M. H., 2002.** Recent and future changes in Arctic sea ice simulated by the HadCM3 AOGCM, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29(24), pp. 2175, doi:10.1029/2001GL014575.
- Hansen J., Nazarenko L., Ruedy R., Sato M., Willis J., Del Genio A., Koch D., Lacis A., Lo K., Menon S., Novakov T., Perlwitz J., Russell G., Schmidt G. A., and Tausnev N., 2005.** Earth’s energy imbalance: Confirmation and implications, *Science*, vol. 308, pp. 1431–1435.
- Hasselmann K., 1979.** On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies, in: *Meteorology of Tropical Oceans*, Shaw D. B. (ed.), Roy. Meteorol. Soc., Bracknell, UK, pp. 251–259.
- Hasselmann K., 1997.** Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change, *Climate Dynamics*, vol. 13, pp. 601–612.
- Hegerl G. C., Zwiers F. W., Braconnot P., Gillett N. P., Luo Y., Marengo Orsini J. A., Nicholls N., Penner J. E., and 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., and Miller H. L. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Ichinose T., Shimodozono K., and Hanaki K., 1999.** Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmos. Environ.*, vol. 33, pp. 3897–3909.
- IDAG, 2005.** Detecting and attributing external influences on the climate system: A review of recent advances, *J. Climate*, vol. 18, pp. 1291–1314.
- Jansen E., Overpeck J., Briffa K. R., Duplessy J.-C., Joos F., Masson-Delmotte V., Olago D., Otto-Bliesner B., Peltier W. R., Rahmstorf S., Ramesh R., Raynaud D., Rind D., Solomina O., Villalba R., and Zhang D., 2007.** Paleoclimate, 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., and Miller H. L. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Johannessen O. M., Bengtsson L., Miles M. W., Kuzmina S. I., Semenov V. A., Alekseev G. V., Nagurnyi A. P., Zakharov V. F., Bobylev L. P., Pettersson L. H., Hasselmann K., and Cattle H. P., 2004.** Arctic climate change: Observed and modelled temperature and sea-ice variability, *Tellus*, vol. 56A, pp. 328–341.
- Kattsov V. M. and Sporyshev P. V., 2006.** Timing of global warming in IPCC AR4 AOGCM simulations, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, L23707, doi: 10.1029.2006GL027476.
- Kattsov V. M., Walsh J. E., Chapman W. L., Govorkova V. A., Pavlova T. V., and Zhang X., 2007.** Simulation and projection of Arctic freshwater budget components by the IPCC AR4 global climate models, *J. Hydrometeorology*, vol. 8, pp. 571–589.
- Knight J. R., Allan R. J., Folland C. K., Vellinga M., and Mann M. E., 2005.** A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, L20708, doi: 10.1029/2005GL024233.

- Levitus S., Antonov J., and Boyer T., 2005.** Warming of the World Ocean, 1955–2003, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Mitchell J. F. B., Karoly D. J., Hegerl G. C., Zwiers F. W., Allen M. R., and Marengo J., 2001.** Detection of climate change and attribution of causes, in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K., Johnson C. A. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, pp. 695–738.
- Nagashima T., Shiogama H., Yokohata T., Takemura T., Crooks S. A., and Nozawa T., 2006.** Effect of carbonaceous aerosols on surface temperature in the midtwentieth century, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, L04702, doi:10.1029/2005GL024887.
- Nakićenović N., Grubler A., and McDonald A. (eds.), 1998.** *Global Energy Perspectives*, New York, NY, Cambridge University Press, 299 p.
- Overland J. E., Spillane M. C., Percival D. B., Wang M., and Mofjeld H. O., 2004.** Seasonal and regional variation of Pan-Arctic air temperature over the instrumental record, *J. Climate*, vol. 17, pp. 3263–3282.
- Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J.-M., Basile, Bender M., Chppellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V. M., Legrand M., Lipenkov V. Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., and Stievenard M., 1999.** Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, vol. 399/3, pp. 429–436.
- Polyakov I. V., Johnson M. A., Colony R. L., Bhatt U., and Alekseev G. V., 2002.** Observationally based assessment of polar amplification of global warming, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, 1878, doi:10.1029/2001GL011111.
- Serreze M. C. and Francis J. A., 2006.** The Arctic amplification debate, *Climatic Change*, vol. 76(3–4), pp. 241–264, doi:1007/s10584-005-9017-y.
- Sorteberg A., Kattsov V., Walsh J. E., and Pavlova T., 2007.** The Arctic surface energy budget as simulated with the IPCC AR4 AOGCMs, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-006-0222-9.
- Stott P. A., Stone D. A., and Allen M. R., 2004.** Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature*, vol. 432, pp. 610–614.
- Stott P. A., Tett S. F. B., Jones G. S., Allen M. R., Mitchell J. F. B., and Jenkins G. J., 2000.** External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings, *Science*, vol. 290, pp. 2133–2137.
- Trenberth K., Jones P. D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J. A., Rusticucci M., Soden B., and Zhai P., 2007.** Observations: Surface and atmospheric climate change, in: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Working 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., and Miller H. L. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Vinnikov K. Y. et al., 1999.** Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent, *Science*, vol. 286(5446), pp. 1934–1937.
- Wang M., Overland J. E., Kattsov V., Walsh J. E., Zhang X., and Pavlova T., 2007.** Intrinsic versus forced variation in coupled climate model simulations over the Arctic during the twentieth century, *J. Climate*, vol. 20(6), pp. 1093–1107.